

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра электроэнергетики и электротехники**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.И. Луковникова

« \_\_\_\_\_ » декабря 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**Б1.Б.13**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Электроснабжение**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>	
3.1 Распределение объема дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	10
4.3 Лабораторные работы.....	63
4.4 Практические занятия.....	63
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	63
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>64</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>64</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>64</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>65</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>65</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ / практических занятий .....	65
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>84</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>91</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>92</b>

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Формирование знаний в области физических основ материаловедения, современных методов получения конструкционных материалов, способов диагностики и улучшения их свойств.

## Задачи дисциплины

Приобретение студентами практических навыков в области материаловедения и эффективной обработки и контроля качества материалов.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<b>знать:</b> -основы материаловедения и технологии конструкционных материалов; -методики по испытанию электротехнических и конструкционных материалов и анализа их характеристик; -электротехнические материалы в качестве компонентов электротехнического и электроэнергетического оборудования. <b>уметь:</b> - использовать знания основ материаловедения и технологии конструкционных материалов для понимания физических основ функционирования электрических аппаратов; -оценить состояние материалов по результатам испытаний. <b>владеть:</b> –методиками выполнения расчётов применительно к использованию электротехнических и конструкционных материалов; - методами испытания электротехнических и конструкционных материалов

# 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.13 Электротехническое и конструкционное материаловедение относится к базовой.

Дисциплина Электротехническое и конструкционное материаловедение базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Теоретические основы электротехники, Физика, Химия.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электротехническое и конструкционное материаловедение представляет основу для изучения дисциплин: техника высоких напряжений, Электрические машины, Электрические и электронные аппараты, Монтаж оборудования систем электроснабжения

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Заочная	2	-	144	14	6	8	-	121	кр	экзамен

#### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по курсам, час
			2
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	14	4	14
Лекции (Лк)	6	4	6
Лабораторные работы (ЛР)	8	-	8
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	121	-	121
Подготовка к лабораторным работам	28	-	28
Подготовка к экзамену в течение семестра	93	-	93
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен</b>	9	-	9
Общая трудоемкость дисциплины, час.	144		144
зач. ед.	4		4

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
<b>1.</b>	<b>Основы материаловедения</b>	<b>17,75</b>	<b>0,75</b>	-	-	<b>17</b>
1.1.	Классификация материалов	2.25	0,25	-	-	2
1.2.	Виды химических связей	2	-	-	-	2
1.3.	Строение твердых тел	2	-	-	-	2
1.4.	Дефекты строения твердых тел	2	-	-	-	2
1.5.	Способы термообработки металлов и сплавов	7.25	0,25	-	-	7

1	2	3	4	5	6	7
1.6.	Классификация веществ по электрическим свойствам	2.25	0,25	-	-	2
<b>2.</b>	<b>Диэлектрические материалы</b>	<b>57,25</b>	<b>2,25</b>	<b>8</b>		<b>47</b>
2.1.	Поляризация диэлектриков	2.25	0,25	-	-	2
2.2.	Основные виды поляризации	4.25	0,25	-	-	4
2.3.	Классификация диэлектриков по виду поляризации	1	-	-	-	1
2.4.	Относительная диэлектрическая проницаемость	6	-	2	-	4
2.5.	Электропроводность диэлектриков	4.25	0,25	-	-	4
2.6.	Диэлектрические потери	4.25	0,25	-	-	4
2.7.	Пробой диэлектрика	10.25	0,25	2	-	8
2.8.	Классификация диэлектрических материалов	1	-	-	-	1
2.9.	Газообразные диэлектрики	3.25	0,25	1	-	2
2.10.	Жидкие диэлектрики.	6.25	0,25	1	-	5
2.11.	Твердеющие диэлектрики	4	-	-	-	4
2.12.	Твёрдые диэлектрики	10.5	0,5	2	-	8
<b>3.</b>	<b>Проводниковые материалы</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>-</b>		<b>19</b>
3.1.	Классификация проводниковых материалов	2.25	0,25	-	-	2
3.2.	Параметры, характеризующие свойства проводниковых материалов	2	-	-	-	2
3.3.	Материалы высокой проводимости	6.25	0,25	-	-	6
3.4.	Сверхпроводники и криопроводники	2.25	0,25	-	-	2
3.5.	Сплавы высокого сопротивления	4.25	0,25	-	-	4
3.6.	Другие проводниковые материалы	2	-	-	-	2
3.7.	Припой и флюсы	1	-	-	-	1
<b>4</b>	<b>Полупроводниковые материалы</b>	<b>11.5</b>	<b>0,5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>11</b>
4.1.	Общие сведения о полупроводниках	2	-	-	-	2
4.2.	Классификация полупроводников	1	-	-	-	1
4.3.	Элементы, обладающие свойствами полупроводников	4.25	0,25	-	-	4
4.4.	Химические соединения со свойствами полупроводников	4.25	0,25	-	-	4
<b>5</b>	<b>Магнитные материалы</b>	<b>12.5</b>	<b>0,5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>12</b>
5.1.	Параметры, характеризующие свойства магнитных материалов	2	-	-	-	2
5.2.	Магнитомягкие материалы	6.25	0,25	-	-	6
5.3.	Магнитотвёрдые материалы	4.25	0,25	-	-	4
<b>6.</b>	<b>Конструкционные материалы</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>15</b>
6.1.	Параметры, характеризующие свойства конструкционных материалов	2.25	0,25	-	-	2
6.2.	Классификация конструкционных материалов	2.25	0,25	-	-	2
6.3.	Металлические конструкционные материалы	7.25	0,25	-	-	7
6.4.	Композиционные материалы	4.25	0,25	-	-	4
	<b>ИТОГО</b>	<b>135</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>-</b>	<b>121</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Основы материаловедения

#### Тема 1.1. Классификация материалов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция с разбором конкретных ситуаций(0,25 час).

Электротехника относится к одной из наиболее быстро развивающихся областей, требующих большого разнообразия новых электротехнических и конструкционных материалов, применение которых позволит выпускать оборудование с высокой надежностью, быстродействием, устойчивостью к воздействиям окружающей среды, агрессивных сред, ионизирующих излучений, магнитных полей и т.д.

Дисциплина «Электротехническое и конструкционное материаловедение» знакомит студентов с основными материалами, применяемыми в электротехнике.

Все материалы можно разделить на две группы:

- электротехнические;
- конструкционные.

Электротехническими называются материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в электротехнике с учётом этих свойств.

В практике различные материалы испытывают воздействие как отдельных сторон электромагнитного поля – электрического и магнитного полей, так и с их совокупности. По поведению в электрическом поле их подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические; по поведению в магнитном поле - на сильномагнитные и слабомагнитные (немагнитные).

Кроме того, ни одна электротехническая установка не может быть выполнена без применения конструкционных материалов. Из них изготавливают несущие элементы и конструкции электроустановок, опорные, крепежные, вспомогательные узлы и детали электрических аппаратов.

#### Тема 1.2. Виды связей

Основными элементарными частицами, из которых состоят все известные нам вещества, являются протоны, нейтроны и электроны. Протон и нейтрон, соединяясь вместе, образуют атомное ядро, а отрицательные электроны заполняют внешние оболочки атомов и компенсируют положительный заряд ядра.

Если атом теряет часть электронов, то из него образуется положительно заряженный ион. Если же, наоборот, атом присоединяет к себе дополнительные электроны, то из него образуется отрицательный ион.

Атомы и ионы могут соединяться между собой и образовывать молекулы. При этом известны четыре вида химической связи между частицами.

**Ковалентная связь** имеет место тогда, когда два атома имеют общие электроны (рис. 1.1). Например:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  ....

С помощью ковалентной связи могут образовываться полярные и неполярные молекулы.

*Неполярная молекула* – молекула, в которой центры одинаковых по величине положительных и отрицательных зарядов совпадают.

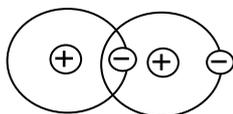


Рис. 1.1. Ковалентная молекула

*Полярная молекула* – молекула, в которой центры одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов находятся на расстоянии друг от друга. Такие молекулы называются диполями. Они характеризуются дипольным моментом:

$$\mu = q \cdot l, \quad (1.1)$$

где  $\mu$  – полярный момент;  $q$  – заряд частицы;  $l$  – расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда (рис. 1.2).

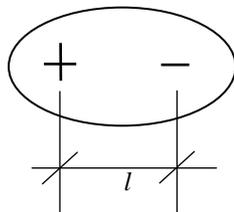
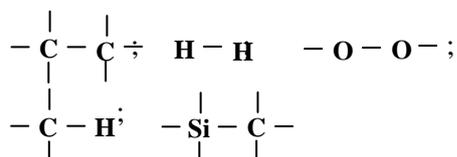


Рис. 1.2. Диполь

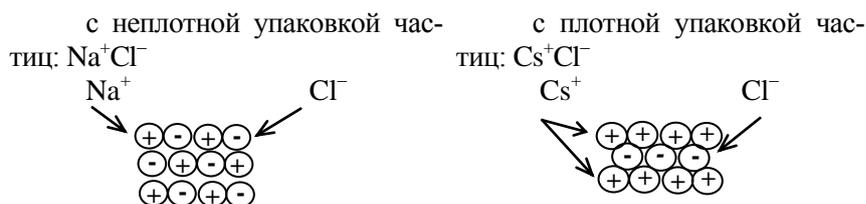
Ковалентная связь может существовать как между атомами одного и того же элемента так и между атомами различных элементов:



Ковалентная связь характерна для веществ, находящихся в любом агрегатном состоянии (газообразном, жидком, твердом). Существуют твердые тела с ковалентной связью, являющиеся кристаллами (пример: алмаз, германий, кремний).

Твёрдые тела с ковалентной связью обладают очень высокой механической прочностью и высокой температурой плавления.

**Ионная связь** определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Этот вид связи характерен только для твердых тел. Силы притяжения между ионами настолько велики, что тела с ионной связью имеют высокую механическую прочность и высокую температуру плавления (но меньше, чем у веществ с ковалентной связью). Различают вещества с неплотной упаковкой частиц и вещества с плотной упаковкой частиц:



**Металлическая связь** имеет место в металлах. Определяется силами притяжения между свободными электронами и положительными ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Силы притяжения достаточно велики, поэтому для большинства металлов характерна высокая механическая прочность и высокая температура плавления. Наличие свободных электронов определяет высокую электропроводность металлов и высокую теплопроводность.

**Молекулярная связь** (связь Ван-дер-Ваальса) осуществляется между молекулами с ковалентной внутримолекулярной связью (рис. 1.3).

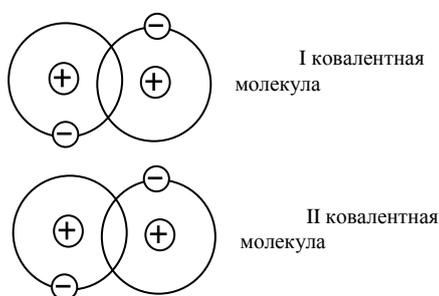


Рис. 1.3. Связь Ван-дер-Ваальса

Силы притяжения определяются согласованным движением валентных электронов: в любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительному заряду соседней молекулы.

Так как силы притяжения между электронами и положительными зарядами соседних молекул не намного превышают силы отталкивания между электронами, то у тел со связью Ван-дер-Ваальса низкая механическая прочность и низкая температура плавления. Примером такого тела является парафин.

## Тема 1.3. Строение твердых тел

В твёрдых телах частицы могут располагаться упорядоченно или хаотично. В зависимости от расположения частиц различают кристаллические твёрдые тела, аморфные и аморфно- кристаллические.

**Кристаллические тела** содержат в своей основе кристаллическую решётку.

*Кристаллическая решетка* – характерное для любого кристаллического состояния вещества регулярное расположение частиц (атомов, молекул, ионов) в трех измерениях, характеризующееся периодической повторяемостью.

Свойства кристаллических веществ в разных направлениях кристалла будут различны (пример: алмаз, кремний).

**Аморфные тела** – частицы расположены хаотично. Свойства веществ в разных направлениях одинаковы. В отличие от кристаллических веществ, аморфные не имеют ярко выраженной температуры плавления. Переход из твёрдого состояния в жидкое у аморфных тел происходит в некотором интервале температур, поэтому аморфные вещества характеризуются температурой размягчения (пример: смолы, стекла).

**Аморфно-кристаллические вещества** могут находиться как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии, причём аморфное состояние менее устойчиво и при определённых условиях (давлении, температуре) может самопроизвольно переходить в кристаллическое (пример: кварц, ситаллы).

### 1.3.1. Атомно-кристаллическое строение металлов

Все металлы имеют в своей основе кристаллическую решетку

*Кристаллическая решетка* – упорядоченное расположение частиц в трех измерениях, характеризующееся определенной периодичностью. Если в узлах расположены атомы, такая решетка называется атомной. Расстояние между узлами кристаллической решетки называется ее *параметром*. При изменении температуры тело или расширяется, или сжимается, значит, и параметры кристаллической решетки тоже будут меняться. Как следствие металлы в разных температурных интервалах приобретают разную кристаллическую решетку и в соответствии с этим меняются их физико-химические свойства.

Существование у металлов нескольких видов кристаллических решеток при разных температурных интервалах называется *полиморфизмом* или *аллотропией*. Преобразование кристаллической решетки при изменении температуры называется *полиморфным превращением*, а образовавшийся в результате этого материал называется *полиморфной модификацией*. Полиморфная модификация обозначается греческими буквами ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д.), которые в качестве индексов приписываются к символу основного элемента, например:  $\alpha$ -Fe. Полиморфную модификацию при самой низкой температуре обозначают буквой  $\alpha$ , при более высокой –  $\beta$  и т.д.

### 1.3.2. Фазово-структурный состав сплавов

Сплавы – это материалы, полученные путем сплавления двух или нескольких элементов, в качестве которых могут выступать металлы или неметаллы. Основные элементы, входящие в состав сплава, называются *компонентами*. Кроме них в состав сплавов могут входить примеси, которые бывают вредными и полезными:

- *вредные* – примеси, ухудшающие характеристики сплава (азот, кислород, водород, сера, фосфор);

- *полезные* – примеси, улучшающие его характеристики (марганец, магний, кремний и т.д.).

Кроме того, примеси бывают случайные, случайно попадающие в сплав при его приготовлении, и специальные, вводимые в сплав для придания ему определенных свойств.

Сплавы, как и чистые металлы, имеют в своей основе кристаллическую решётку, однако она сложнее, чем у чистых металлов. В зависимости от взаимодействия отдельных компонентов сплавы могут иметь разную структуру:

- *твёрдый раствор* – соединяются взаимно растворимые компоненты. Один из компонентов сохраняет свою кристаллическую решётку, а атомы других распределяются внутри нее;

- *химическое соединение* – компоненты вступают в химическую реакцию, в результате которой образуется новая кристаллическая решётка, не похожая на решётку составляющих компонентов;

- *механическая смесь* – соединяются взаимно нерастворимые компоненты, при этом каждый из компонентов сохраняет свою кристаллическую решётку. В результате такой сплав представляет собой смесь из различных кристаллов.

Сплав структуры «механическая смесь» обладает определённой температурой плавления. При этой температуре происходит переход из твёрдого состояния в жидкое. Тогда как у сплавов типа «твёрдый раствор» и «химическое соединение» переход из твердого состояния в жидкое происходит на некотором интервале температур. На этом интервале указанные сплавы представляют собой смесь жидкого расплава и твёрдых кристаллов.

## Тема 1.4. Дефекты твердых тел

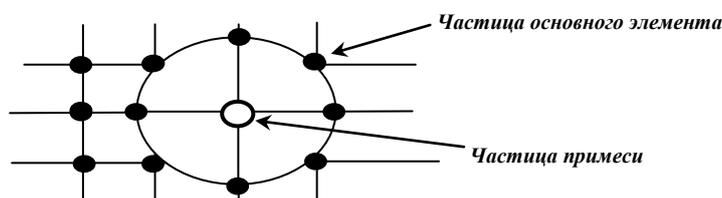
**Дефект** – любое нарушение упорядоченности электростатического поля кристаллической решетки.

Дефекты твердого тела могут быть вызваны:

1. Нарушением стехиометрического состава кристаллической решетки:



2. Наличием примесей:



3. Наличием механически напряженных участков в теле.
4. Наличием дополнительных плоскостей на материале (поры, трещины, сколы).

Дефекты по своей природе бывают:

- тепловые (связанные с выделением или поглощением теплоты);
- биографические (связанные с процессом изготовления).

Дефекты твёрдого тела приводят к изменениям свойств вещества, в некоторых случаях ухудшая их, а в некоторых – улучшая. Например, для магнитных веществ чем больше дефектов, тем лучше характеристики.

## Тема.1.5. Способы термообработки металлов и сплавов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-диспут (0,25 час).

При изменении температуры материала может меняться его кристаллическая решётка и соответственно его физико-химические свойства. Поэтому для создания материала с определёнными свойствами необходимо правильно выбирать не только состав сплава, но и режим его термообработки.

В общем случае термообработка сводится к тому, что материал нагревают до высокой температуры, выдерживают при этой температуре, затем охлаждают. В результате образуются различные полиморфные модификации одного и того же материала.

К основным операциям термообработки относятся:

- *отжиг* – нагрев материала до высоких температур с последующим медленным охлаждением вместе с печью. В результате снижаются внутреннее напряжение, твёрдость и хрупкость материала и повышается его пластичность;
- *нормализация* – нагрев материала до очень высоких температур с последующим быстрым охлаждением на открытом воздухе. В результате повышается механическая прочность сплава;
- *закалка* – нагрев материала до очень высоких температур с последующим охлаждением в воде или масле. Изменяя скорость охлаждения, можно изменять механические свойства материала. При быстром охлаждении увеличивается его твёрдость, но появляется внутреннее напряжение, поэтому увеличивается хрупкость. При более медленном охлаждении хрупкость снижается при сохранении твёрдости;
- *отпуск* – нагрев материала до меньших температур, чем в предыдущих операциях. Отпуск применяется как дополнительная к закалке процедура для повышения механической прочности материала и его пластичности.

## Тема 1.6. Классификация веществ по электрическим свойствам

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-диспут (0,25 час).

Все известные вещества можно разделить на проводники, полупроводники и диэлектрики. Различие их наиболее наглядно можно представить с помощью энергетических диаграмм на основании зонной теории твердого тела.

В соответствии с этой теорией любой атом имеет определенные энергетические состояния (уровни). Часть этих уровней заполнена электронами в нормальном невозбужденном состоянии атома. Другая часть остается в невозбужденном состоянии свободной.

После внешнего энергетического воздействия на атом электроны могут перейти с основного уровня на свободные. Затем атом, пытаясь перейти в устойчивое состояние, испускает избыток энергии в виде фотона, а электроны перемещаются обратно на уровни с наименьшей энергией. Перемещающиеся с уровня на уровень электроны создают электрический ток.

Вещество состоит из множества атомов. Отдельные уровни каждого из атомов соединяются вместе и образуют целые зоны (рис. 1.4). Поэтому энергетическая диаграмма вещества в общем случае выглядит следующим образом:

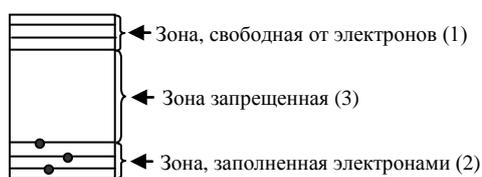


Рис. 1.4. Энергетическая диаграмма вещества

Чтобы перейти из зоны 2 в зону 1, электрон должен преодолеть зону 3. Для этого ему необходимо сообщить определенную энергию, которая называется энергией активации. Чем шире запрещенная зона, тем труднее ее преодолеть и тем больше энергии надо передать электронам, находящимся в зоне 2.

Именно по ширине запрещенной зоны и различают проводники, полупроводники и диэлектрики.

**Диэлектрик** – материал с большой запрещенной зоной. Электропроводность при обычных условиях не наблюдается.

**Полупроводник** – материал с меньшей запрещенной зоной. При внешних энергетических воздействиях по полупроводнику может протекать электрический ток.

**Проводник** – материал практически без запрещенной зоны. Зона 1 подходит вплотную к зоне 2 или даже частично перекрывается ею. Поэтому электроны могут свободно переходить из одной зоны в другую даже при незначительных внешних воздействиях.

Вещества могут переходить из одного состояния в другое в зависимости от их структуры и агрегатного состояния:

	твёрдое состояние → проводник
металл →	
	газообразное → диэлектрик
	алмаз → диэлектрик
углерод →	графит → проводник

**Электропроводность** – это способность материала проводить электрический ток. Она зависит от следующих факторов:

- от ширины запрещённой зоны (чем меньше ширина, тем выше электропроводность, т.к. электроны проще преодолевают запрещенную зону);
- источника внешнего воздействия (электрическое поле, магнитное поле, потоки заряженных частиц, рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, сильный нагрев);
- наличия примесей;
- агрегатного состояния вещества и от вида химической связи;
- температуры (разные материалы по-разному реагируют на изменение температуры);
- если диэлектрик: при увеличении температуры увеличивается подвижность зарядов и электропроводность возрастает;

- если полупроводник: при увеличении температуры увеличивается подвижность зарядов и электропроводность возрастает. Если  $t = 0$  К, то количество зарядов равно нулю, и электропроводность равна нулю, даже если на полупроводник производится внешнее энергетическое воздействие;
  - если проводник: увеличение температуры приводит к уменьшению электропроводности.
- Если  $t = 0$  К, то электропроводность возрастает до  $\infty$ ;
- давления;
  - наличия дефектов в твёрдом теле.

## Раздел 2. Диэлектрики в электрическом поле

Под действием приложенного напряжения в диэлектрике начинают протекать следующие явления:

- 1) поляризация (характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ );
- 2) электропроводность (характеризуется удельным сопротивлением  $\rho$  и удельной проводимостью  $\gamma$ );
- 3) диэлектрические потери (характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  и удельными потерями мощности  $p$ );
- 4) процессы теплового и электрического старения (характеризуются сроком службы диэлектрика  $\tau$  и рабочей температурой  $T_{\text{РАБ}}$ );
- 5) пробой диэлектрика (характеризуется пробивным напряжением  $U_{\text{пр}}$  и электрической прочностью  $E_{\text{пр}}$ ).

Каждое из перечисленных явлений может протекать в одном и том же диэлектрике в зависимости от условий. Причем поляризация, электропроводность, диэлектрические потери, тепловое и электрическое старение тесным образом взаимосвязаны между собой и могут протекать в диэлектрике одновременно после подключения напряжения.

### Тема 2.1. Поляризация диэлектриков

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

Основной процесс для диэлектриков, находящихся в электрическом поле, – **поляризация**, т.е. ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация диполей по направлению электрического поля.

Любой диэлектрик с нанесёнными на его поверхность электродами можно рассматривать как конденсатор определённой ёмкости. То есть если диэлектрик поместить между двумя электродами и подать напряжение, то заряды в диэлектрике будут смещаться на какую-то величину (рис. 1.5), а если диэлектрик состоит из диполей, то диполи будут не только смещаться, но еще и разворачиваться по направлению поля: плюсом к отрицательному электроду, а минусом – к положительному (рис. 1.6).

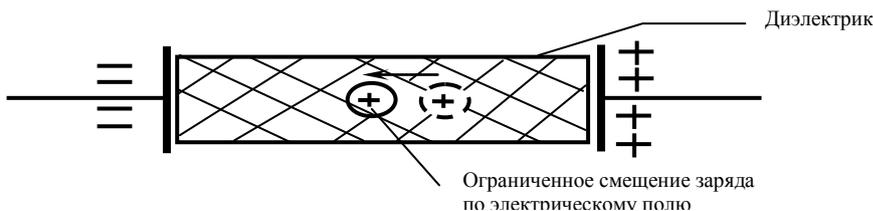


Рис. 1.5. Поляризация неполярного диэлектрика

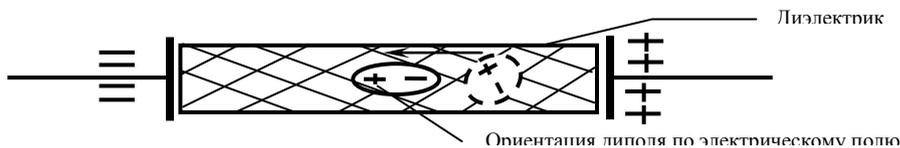


Рис. 1.6. Поляризация полярного диэлектрика

После снятия электрического поля частицы возвращаются на свои места, а диполи разворачиваются согласно хаотичному тепловому движению частиц.

Для большинства диэлектриков существует линейная зависимость величины смещения заряда  $\Delta l$  от напряженности электрического поля  $E$  (чем больше напряженность, тем сильнее смещаются заряды) (характеристика 1 на рис. 1.7).

Однако есть группа диэлектриков, у которых при определенной напряженности  $E_{\text{НАС}}$  (напряженность насыщения) заряды прекращают смещаться и при дальнейшем увеличении напряженности остаются на своих местах (характеристика 2). Диэлектрики с такой зависимостью поляризации от напряженности называются *сегнетоэлектриками*.

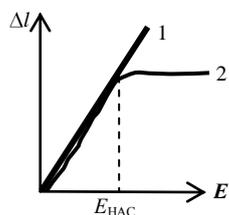


Рис. 1.7. Зависимость величины смещения от напряжённости электрического поля

## Тема 2.2. Основные виды поляризации

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

Поляризация делится на два основных вида:

1. Поляризация **мгновенная**, упругая, без нагрева диэлектрика (без выделения теплоты). Включает в себя электронную и ионную поляризации.

а) *Электронная поляризация* (ЭП) связана со смещением электронов в оболочках атомов. Протекает очень быстро: за  $10^{-15}$  с.

С увеличением температуры ЭП уменьшается. Это связано с тем, что при нагреве тело расширяется и количество частиц в единице объема снижается, следовательно, меньшее количество зарядов участвует в поляризации.

ЭП наблюдается у всех видов диэлектриков, находящихся в любом агрегатном состоянии.

б) *Ионная поляризация* (ИП) характерна только для твердых тел с ионной структурой, связана со смещением ионов. Протекает за  $10^{-13}$  с.

В отличие от ЭП с увеличением температуры ИП усиливается. Это объясняется тем, что при увеличении температуры тела расширяются, расстояние между зарядами увеличивается и связи между ними ослабевают. В результате этого заряды начинают легче смещаться под воздействием приложенного напряжения и поляризация растет.

2. Поляризация **замедленная**, протекающая по возрастающей и убывающей, с выделением теплоты и рассеиванием энергии (релаксационная). Она включает в себя следующие подвиды.

а) *Дипольно-релаксационная поляризация* (ДРП) характерна для полярных диэлектриков. Она протекает только в том случае, если силы межмолекулярного притяжения позволяют диполям смещаться и ориентироваться по направлению электрического поля.

На нее влияют тепловые движения частиц. С увеличением температуры поляризация вначале увеличивается, т.к. при нагреве за счет расширения тела связи между зарядами ослабевают и они легче смещаются и разворачиваются, а потом начинает ослабевать, т.к. хаотичное тепловое движение при высокой температуре мешает диполям поляризоваться.

При разворачивании диполей по направлению поля происходит их трение друг об друга и диэлектрик нагревается.

б) *Электронно-релаксационная поляризация* (ЭРП) протекает у твердых тел, имеющих дефекты строения.

в) *Ионно-релаксационная поляризация* (ИРП) протекает у твердых тел с неполной упаковкой частиц.

г) *Миграционная поляризация* (МП) протекает в твердых веществах, имеющих примеси. Эта поляризация вызывает значительный нагрев материала.

д) *Резонансная поляризация* протекает при сверхвысоких частотах у газов и твердых диэлектриков, имеющих дефект строения.

е) *Спонтанная поляризация* характерна для сегнетоэлектриков. В отличие от других видов поляризации при некотором значении напряжённости электрического поля наступает его насыщение и дальнейшее усиление поля уже не вызывает повышения поляризации.

## Тема 2.3. Классификация диэлектриков по виду поляризации

По виду поляризации диэлектрики разделяются на четыре группы:

1) диэлектрики, имеющие только электронную поляризацию. К этой группе относятся неполярные и слабополярные твердые тела (парафин), жидкости (бензол) и газы (водород);

2) диэлектрики, имеющие одновременно электронную и дипольно-релаксационную поляризацию. К этой группе относятся органические твердые диэлектрики, полужидкие диэлектрики, все полярные вещества (савол, смолы, компаунды, целлюлоза и т.д.);

3) неорганические твердые диэлектрики, в которых могут одновременно протекать ЭП, ИП, ЭРП, ИРП. Эту группу, в свою очередь, делят на две подгруппы:

а) диэлектрики с ЭП и ИП. Это вещества, имеющие ионную структуру с плотной упаковкой частиц (кварц, слюда, KCl);

б) диэлектрики с ЭРП, ИРП, ЭП, ИП. Это вещества, у которых ионная структура с неплотной упаковкой частиц (неорганическое стекло, фарфор);

4) сегнетоэлектрики. Определяющей в данном случае будет спонтанная поляризация, однако кроме нее в сегнетоэлектриках могут протекать ЭП, ИП, ЭРП, ИРП.

#### Тема 2.4. Относительная диэлектрическая проницаемость

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,5час).

Основной характеристикой диэлектрика, по которой можно судить о степени поляризации вещества, является  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость (чем выше  $\epsilon_r$ , тем лучше поляризуется диэлектрик):

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}, \quad (1.2)$$

где  $Q_0$  – заряд конденсатора, если между обкладками вакуум;

$Q_d$  – заряд конденсатора, если между обкладками диэлектрик.

Из приведенной выше формулы видно, что  $\epsilon_r \geq 1$ ;  $\epsilon_r = 1$ , если между обкладками конденсатора находится именно вакуум.

##### 2.4.1. Диэлектрическая проницаемость газов

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

Газообразные вещества характеризуются малыми плотностями вследствие больших расстояний между молекулами. Поэтому  $\epsilon_r$  всех газов незначительна и близка к единице. Поляризация газов может быть чисто электронной или одновременно электронной и дипольно-релаксационной (у полярных газов). Однако даже для полярных газов основное значение имеет ЭП.

Величина диэлектрической проницаемости, как и самой электронной поляризации, зависит от следующих факторов:

– от размера молекул: с увеличением радиуса молекулы ( $R \uparrow$ )  $\epsilon_r$  возрастает. Например, при нормальных условиях (н.у.)  $P = 0,1$  МПа и  $t = 20$  °С:

Газ	$R$ , нм	$\epsilon_r$
Гелий, He	0,112	1,000072
Водород, H <sub>2</sub>	0,135	1,00027
Кислород, O <sub>2</sub>	0,182	1,00055

– от числа частиц в единице объема  $n_0$ :

$$n_0 = P / kT, \quad (1.3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $P$  – давление;  $T$  – температура.

Из этой формулы, в свою очередь, следует, что  $\epsilon_r$  также зависит:

– от давления:  $P \uparrow$  ЭП  $\uparrow$   $\epsilon_r \uparrow$ ;

– от температуры:  $t \uparrow$  ЭП  $\downarrow$   $\epsilon_r \downarrow$ .

Температурная зависимость обычно характеризуется температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости,  $K^{-1}$ :

$$\alpha_{\epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dT}. \quad (1.4)$$

Для неполярных газов

$$\alpha_{\epsilon_r} = \frac{\epsilon_r - 1}{T}. \quad (1.5)$$

Физический смысл температурного коэффициента  $\alpha_{\epsilon_r}$  в том, что он показывает, как изменяется  $\epsilon_r$  газа при изменении температуры на 1 К.

### 2.4.2. Диэлектрическая проницаемость жидкостей

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков зависит от их полярности, т.к. они могут быть построены из полярных и неполярных молекул.

В неполярных жидкостях может протекать только электронная поляризация, и поэтому значения  $\epsilon_r$  неполярных жидкостей невелики: не превышают 2,5. Зависимость  $\epsilon_r$  от температуры  $t^\circ$  также определяется электронной поляризацией (на рис. 1.8 представлена зависимость  $\epsilon_r$  для неполярных жидкостей, в данном случае для бензола):

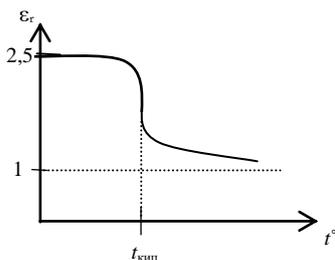


Рис. 1.8. Зависимость  $\epsilon_r = f(t^\circ)$  для бензола

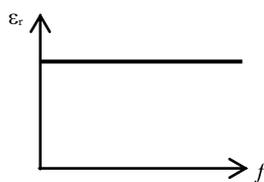


Рис. 1.9. Зависимость  $\epsilon_r = f(f)$  для неполярного жидкого диэлектрика

От частоты приложенного электрического поля  $f$  диэлектрическая проницаемость не зависит (рис. 1.9).

Температурная зависимость  $\epsilon_r$  полярных жидкостей (например, совола) более сложная, чем неполярных (рис. 1.10). Объяснение этого – дипольно-релаксационная поляризация, которая протекает по возрастающей и убывающей, замедленно. Диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей колеблется от 3,5 до 5,5.

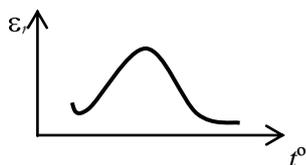
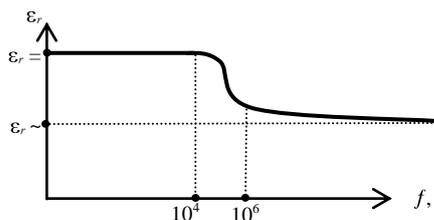


Рис. 1.10. Зависимость  $\epsilon_r = f(t^\circ)$  для полярных жидкостей

Значительное влияние на  $\epsilon_r$  полярных жидкостей оказывает частота  $f$  приложенного электрического поля. При низких частотах диполи успевают разворачиваться при смене полярности электродов, и поэтому  $\epsilon_r$  велика и практически неизменна. При высоких частотах диполи не успевают разворачиваться и диэлектрическая проницаемость падает до значения  $\epsilon_r \sim$  (рис. 1.11). При частотах более  $10^6$  Гц диполи вообще перестают реагировать на изменение полярности электродов и остаются на своих прежних местах.



$\epsilon_r =$  – при постоянном токе  
 $\epsilon_r \sim$  – при переменном токе

Рис. 1.11. Зависимость  $\epsilon_r$  от частоты электрического поля для полярных жидкостей

### 2.4.3. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость твердых тел зависит от структурных особенностей твердого диэлектрика. В твердых телах возможны все виды поляризации. Они могут иметь ковалентную или молекулярную связи и при этом быть неполярными или полярными. В неполярном твердом диэлектрике будет протекать только электронная поляризация, которая и определяет зависимости  $\epsilon_r$  от температуры и частоты электрического поля (рис. 1.12, а, б).

Таким образом, для твердых неполярных диэлектриков характерны те же закономерности, что и для неполярных жидкостей и газов.

В полярных твердых диэлектриках (например, целлюлоза, лёд) протекают электронная и дипольно-релаксационная поляризации. При этом определяющей является ДРП, и, следовательно,  $\epsilon_r$  при увеличении температуры изменяется по возрастающей и убывающей (рис. 1.13).

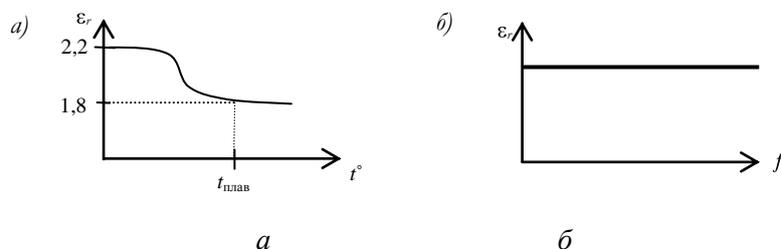


Рис. 1.12. Зависимость  $\epsilon_r$  для неполярных твёрдых диэлектриков

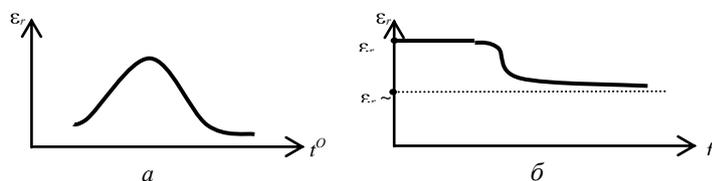


Рис. 1.13. Зависимость  $\epsilon_r$  для полярных твёрдых диэлектриков

Кроме того, твердые тела могут обладать ионной связью и иметь при этом плотную и неплотную упаковку частиц.

В твердых диэлектриках с ионным видом связи и плотной упаковкой частиц будут одновременно протекать электронная и ионная поляризации. Определяющей будет являться ИП, поэтому при увеличении температуры зависимость  $\epsilon_r$  будет возрастать (рис. 1.14). В соответствии с этой зависимостью при увеличении температуры тело расширяется, ионы удаляются друг от друга и связи ослабевают, поэтому частицы легче смещаются и тело лучше поляризуется.

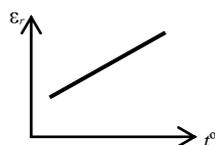


Рис. 1.14. Зависимость  $\epsilon_r$  от температуры для КСl

В твердых диэлектриках с ионным видом связи и неплотной упаковкой частиц будут одновременно протекать электронная, ионная, электронно-релаксационная и ионно-релаксационная поляризации (температурная зависимость  $\epsilon_r$  представлена на рис. 1.15).

Так как в твердых диэлектриках с ионной связью одновременно протекает несколько видов поляризации, следовательно, каждая из них будет вносить свой вклад в общую поляризацию и поэтому  $\epsilon_r$  изменяется в широких пределах (от 4,2 до 200).

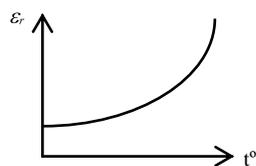


Рис. 1.15. Зависимость  $\epsilon_r = f(t^\circ)$  для твёрдых тел с ионной структурой и неплотной упаковкой частиц

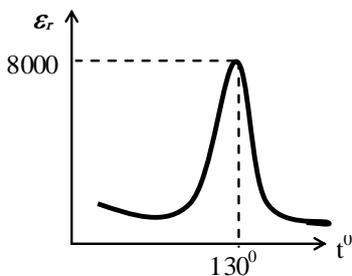


Рис. 1.16. Зависимость  $\epsilon_r = f(t^\circ)$  для титаната бария с до-  
бавками ( $\epsilon_r = 7000 \div 9000$ )

Максимальные значения  $\epsilon_r$  имеют сегнетоэлектрики (например, сегнетова соль: ( $\epsilon_r = 500 \div 600$ )). При этом они характеризуются резко выраженной зависимостью  $\epsilon_r$  от  $t^\circ$  (рис. 1.16). Температура, при которой  $\epsilon_r$  достигает максимума, называется температурой Кюри –  $t^\circ_{\text{Кюри}}$ . При температуре выше  $t^\circ_{\text{Кюри}}$  сегнетоэлектрик теряет свои сегнетоэлектрические свойства.

## Тема 2.6. Электропроводность диэлектриков

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,25час).

**Диэлектрик** – материал, у которого запрещённая зона настолько велика, что электропроводность в обычных условиях не наблюдается. Для того чтобы электроны преодолевали запрещённые зоны, на диэлектрик должно быть произведено очень сильное внешнее энергетическое воздействие.

Таким образом, несмотря на то что диэлектрики (Д) имеют широкую запрещённую зону, при определенных условиях некоторые электроны могут преодолевать ее, создавая тем самым токи утечки через диэлектрик. Электропроводность Д в большинстве случаев обусловлена двумя основными причинами.

1. Поляризационные процессы смещения связанных зарядов до момента установления равновесия протекают во времени, создавая токи смещения ( $I_{\text{см}}$ ). Процессы электронной и ионной поляризаций почти мгновенны, поэтому токи смещения этих видов зафиксировать не удастся. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических Д, фиксируются и называются токами *абсорбции* ( $I_{\text{аб}}$ ). При постоянном напряжении они протекают только в момент включения и выключения напряжения. При переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения Д под действием электрического поля.

2. Наличие в Д немногочисленных свободных электронов приводит к возникновению сквозных токов ( $I_{\text{скв}}$ ).

Поэтому ток утечки в техническом Д представляет собой сумму сквозных токов и токов абсорбции:

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{скв}} + \sum I_{\text{аб}} . \quad (1.5)$$

При воздействии на Д постоянного напряжения после завершения процессов поляризации через Д протекает только сквозной ток (рис. 1.17).

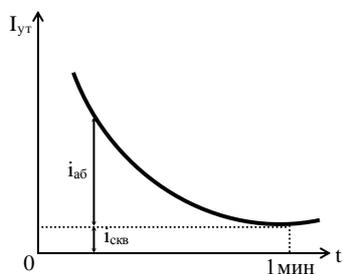


Рис. 1.17. Изменение  $I_{\text{ут}}$  во времени

Таким образом, чтобы не возникло неправильного представления о величине электропроводности Д (т.е., замеряя ток утечки сразу после подключения Д к электрическому полю:

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{скв}} + I_{\text{аб}} ,$$

удивляемся большой электропроводности диэлектрика), ток утечки замеряют через одну минуту после подключения электрического поля. Тогда  $I_{\text{ут}} \approx I_{\text{скв}}$ .

В результате истинное сопротивление Д

$$R_{\text{д}} = \frac{U}{I_{\text{ут}} - \sum I_{\text{аб}}} = \frac{U}{I_{\text{скв}}} . \quad (1.6)$$

При переменном напряжении токи абсорбции протекают в течение всего времени действия напряжения, поэтому сопротивление Д в этом случае

$$R_{\text{д}} = \frac{U}{I_{\text{скв}} + \sum I_{\text{аб}}} = \frac{U}{I_{\text{ут}}} . \quad (1.7)$$

Электропроводность изоляционных материалов обуславливается агрегатным состоянием вещества (жидкость, газ, твердое тело) и зависит также от напряженности электрического поля, температуры, влажности и т.д.

### 2.6.1. Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля  $E$  обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов и свободных электронов, которые, в свою очередь, могут появиться только в результате ионизации\* газа. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с нейтральными молекулами.

Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются рентгеновские, ультрафиолетовые либо космические лучи, радиоактивное излучение, сильный нагрев. Это несамостоятельная ионизация. Электропроводность, обусловленная действием внешних ионизаторов, также называется **несамостоятельной**.

Электропроводность, вызванная ударной ионизацией (заряженные частицы ударяются о молекулу, выбивают ионы), носит название самостоятельной. Она протекает при высоких напряжениях. При слабых электрических полях отсутствует.

Следует заметить, что одновременно с процессом ионизации происходит образование нейтральных молекул путем соединения части положительных ионов с отрицательными частицами. Этот процесс называется **рекомбинацией**. Наличие рекомбинации препятствует безграничному росту числа ионов в газе и объясняет установление определенной концентрации ионов.

Предположим, что ионизированный внешними факторами газ находится между двумя параллельными электродами, к которым приложено напряжение. Ионы под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов нейтрализуется на электродах, часть – исчезает за счет рекомбинации.

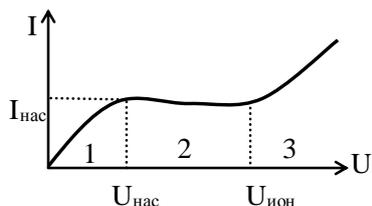


Рис. 1.18. Вольтамперная характеристика газообразного промежутка

Вольтамперную характеристику газа, представляющую собой зависимость тока от приложенного напряжения (рис. 1.18), можно условно разбить на три области:

1. Выполняется закон Ома, запас положительных и отрицательных ионов постоянный. Ток пропорционален напряжению ( $I \equiv U$ ).

2. Зона насыщения. Напряжение увеличивается, ионы уносятся к электродам, не успевая рекомбинировать в межэлектродном промежутке, и при некотором напряжении все ионы будут разряжаться на электродах. Ясно, что дальнейшее увеличение напряжения не будет вызывать возрастания тока.

3. При больших напряжениях может возникнуть ударная ионизация, а следовательно, самостоятельная электропроводность, при этом ток начинает опять увеличиваться. Для воздуха  $E_{ион} = 0,1 \dots 1,0$  МВ/м.

### 2.6.2. Электропроводность жидких диэлектриков

Электропроводность жидкостей тесно связана со строением их молекул. В неполярной жидкости она зависит от наличия примесей, в том числе влаги. Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными (увеличение диэлектрической проницаемости приводит к повышению проводимости). Сильнополярные жидкости обладают очень высокой электропроводностью, поэтому рассматриваются не как Д, а как проводники. Очистка от примесей повышает сопротивление жидкости и снижает ее проводимость.

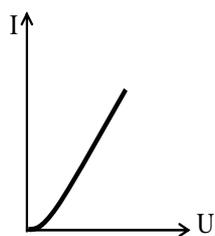


Рис. 1.19. Вольтамперная характеристика жидкого диэлектрика

Удельная проводимость любых жидкостей сильно зависит от температуры: с увеличением температуры увеличивается подвижность ионов и возрастает проводимость. Математически температурная зависимость описывается выражением

$$\gamma = A \exp(-a / T), \quad (1.8)$$

где  $A$  и  $a$  – постоянные, характеризующие данную жидкость;  $T$  – температура жидкости.

\* ионизация – процесс разделения нейтральной молекулы на положительные и отрицательные ионы и электроны.

Электропроводность жидких диэлектриков также зависит от длительности воздействия напряжения. При длительном протекании тока наблюдается повышение сопротивления за счет переноса свободных электронов к электродам (электрическая очистка).

### 2.6.3. Электропроводность твердых диэлектриков

Для твердых  $D$  необходимо различать два вида электропроводности: объемную и поверхностную.

**Объемная электропроводность** обусловлена движением заряженных частиц внутри  $D$ , в его объеме. При этом в создании тока могут участвовать ионы самого диэлектрика, ионы примесей, а также свободные электроны. В зависимости от того, какие частицы перемещаются, различают ионную и электронную электропроводность.

**Ионная электропроводность** наблюдается в слабых электрических полях, сопровождается переносом вещества и характеризуется следующими параметрами:

- удельной объемной проводимостью  $\gamma_v = \frac{1}{\rho}$ ,
- удельным объемным сопротивлением  $\rho_v = \frac{RS}{h}$ ,

где  $R$  – сопротивление данного образца, Ом;  $S$  – площадь поперечного сечения  $D$ , мм<sup>2</sup>;  $h$  – толщина  $D$ , мм.

Величина ионной проводимости зависит от строения твердого тела – аморфного или кристаллического.

Рассмотрим электропроводность диэлектриков, имеющих кристаллическое строение:

- если в узлах кристаллической решетки расположены ионы, (ионная кристаллическая решетка), то при низких температурах в переносе тока участвуют в основном ионы примесей. При повышении температуры начинают освобождаться из узлов решетки ионы основного диэлектрика и за счет этого электропроводность возрастает;

- если в узлах решетки находятся молекулы или атомы (молекулярная или атомарная кристаллическая решетка), то в электропроводности будут участвовать только ионы примесей, т.к. частицы основного диэлектрика прочно связаны с узлами кристаллической решетки.

В кристаллических веществах электропроводность зависит от ее направления внутри кристалла, в разных направлениях она различна.

Электропроводность диэлектриков, имеющих аморфное строение, зависит только от химического состава вещества, в разных направлениях внутри вещества она одинакова.

**Электронная электропроводность** возникает при воздействии на диэлектрик сильных электрических полей, когда в материале возникает ударная ионизация. При этом появляются свободные электроны, электропроводность тела резко возрастает, закон Ома нарушается.

При высоких напряженностях электрического поля  $E \geq 10 \div 100$  МВ/м, когда закон Ома нарушается, для расчетов применяется формула Пуля:

$$\gamma_E = \gamma e^{\beta E}, \quad (1.9)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость диэлектрика в области, где сохраняется закон Ома;  $\gamma_E$  – удельная проводимость диэлектрика при сильных электрических полях;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\beta$  – коэффициент, характеризующий данный диэлектрик.

При очень высоких напряженностях электрического поля, близких к пробивным значениям ( $E \approx E_{пр}$ ), более точной является формула Френкеля:

$$\gamma_E = e^{\beta_1 \sqrt{E}}, \quad (1.10)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент, характеризующий данный диэлектрик.

Электронная электропроводность наблюдается только в сильных электрических полях, переносом вещества не сопровождается.

**Поверхностная проводимость** обусловлена оседанием на поверхности  $D$  различных загрязнений, в том числе влаги. В этом случае ток будет протекать не только внутри диэлектрика, но и по его поверхности, а именно по пленке загрязнения.

Поверхностная электропроводность характеризуется двумя параметрами:

- величиной удельной поверхностной проводимости  $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$ ;

– удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s = \frac{Rd}{l}$ ;

где  $R$  – сопротивление данного образца, Ом;  $d$  – ширина электродов, мм;  $l$  – длина диэлектрика, мм.

На величину поверхностной проводимости оказывают влияние:

1) гладкость поверхности, т.к. если есть поры, трещины, сколы, то в них будут скапливаться загрязнения и электропроводность будет возрастать;

2) полярность загрязнения (чем больше полярность загрязнения, тем больше поверхностная электропроводность).

Для снижения поверхностной электропроводности используют разнообразные приемы:

- 1) полировку и шлифовку поверхности;
- 2) промывку поверхности диэлектрика водой, спиртом или растворителем;
- 3) нанесение на поверхность диэлектрика гидрофобных (отталкивающих влагу) покрытий;
- 4) прокаливание диэлектриков при температурах 700–800 °С;
- 5) кипячение в дистиллированной воде (только для непористых диэлектриков);
- 6) нанесение ребер на поверхность твердого диэлектрика (для увеличения пути для тока утечки).

Таким образом, полная проводимость твердых Д складывается из объемной  $\gamma_V$  и поверхностной  $\gamma_s$  проводимостей.

## Тема 2.6. Диэлектрические потери

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,25час).

**Диэлектрическими потерями (ДП)** называют мощность, рассеиваемую в Д при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев Д. Потери в Д наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном.

ДП обусловлены тремя основными причинами:

- 1) протеканием замедленных видов поляризации;
- 2) протеканием сквозных токов;
- 3) ионизационными процессами.

Величину ДП можно характеризовать двумя параметрами:

1) **удельными потерями** (потери мощности на единицу объема). Выражение для удельных ДП имеет вид

$$P = \frac{P_a}{V} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2, \quad (1.11)$$

где  $P$  – удельные потери;  $P_a$  – активная мощность;  $\omega$  – угловая частота;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость данного Д;  $E$  – напряженность электрического поля;

2) **тангенсом угла диэлектрических потерь** ( $\operatorname{tg} \delta$ ).

На практике для оценки ДП чаще используют именно  $\operatorname{tg} \delta$ .

**Углом ДП** называется угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$  в ёмкостной цепи ( $\delta + \varphi = 90^\circ$ ).

Для идеального Д вектор тока будет опережать вектор напряжения на  $90^\circ$  (рис. 1.20), при этом угол ДП = 0. Диэлектрических потерь нет. Диэлектрик не нагревается.

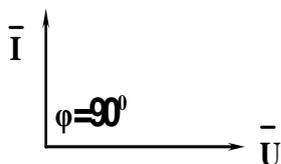


Рис. 1.20. Векторная диаграмма идеального диэлектрика

Для реального Д чем больше рассеиваемая мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол  $\varphi$  и больше угол  $\delta$  и  $\operatorname{tg} \delta$ . Недопустимо большие ДП в электроизоляционном материале вызывают его сильный нагрев и могут привести к его тепловому разрушению.

Величину ДП на практике определяют по выражению

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (1.12)$$

где  $C$  – емкость данного диэлектрика;  $\omega$  – угловая частота;  $U$  – напряжение, приложенное к диэлектрику;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Исходя из формул (1.11), (1.12), видно, что ДП зависят:

- от  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$ , которые являются характеристиками конкретного материала;
- $\omega$  – угловой частоты;
- $U^2$  ( $E^2$ ) – приложенного напряжения (напряженности электрического поля);
- агрегатного состояния вещества.

Диэлектрические потери в газах при напряженностях поля ниже тех, которые необходимы для развития ударной ионизации молекул газа, очень малы. В этом случае газ можно рассматривать как идеальный диэлектрик.

Диэлектрические потери неполярных чистых жидкостей также весьма незначительны. Полярные жидкости в зависимости от условий ( $t^\circ$ ,  $f$ ) могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией.

В твердых диэлектриках диэлектрические потери зависят от структуры: твердые вещества обладают разнообразным составом и строением, в них возможны все виды ДП.

## Тема 2.7. Пробой диэлектрика

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

### 2.7.1. Общая характеристика пробоя диэлектрика

Каждый диэлектрик рассчитан на определенное напряжение. В обозначенных пределах он долго работает и хорошо выполняет свои изоляционные функции. Если же превысить допустимое напряжение, то при некотором его значении может произойти пробой диэлектрика.

**Пробой диэлектрика** – это потеря диэлектриком всех его диэлектрических свойств. После пробоя по диэлектрику начинает протекать большой электрический ток; диэлектрик становится проводником.

Напряжение, при котором произошел пробой, называется **пробивным** и обозначается  $U_{\text{пр}}$ . Измеряется оно чаще всего в [кВ]. **Электрическая прочность** (напряженность электрического поля, при которой произошел пробой) определяется пробивным напряжением  $U_{\text{пр}}$ , отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (1.13)$$

где  $h$  – толщина Д.

Стандартные единицы измерения электрической прочности  $\left[ \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \right]$  или  $\left[ \frac{\text{кВ}}{\text{мм}} \right]$ .

Характеристики пробоя  $E_{\text{пр}}$  и  $U_{\text{пр}}$  зависят от температуры, давления, влажности, примесей, дефектов в твердом теле, от агрегатного состояния вещества и т.д.

Пробой газа обуславливается ударной и фотонной ионизацией. Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Главный фактор, способствующий пробую, – наличие примеси. Пробой твердых тел вызывается как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием электрического поля.

### 2.7.2. Пробой газов

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Внешней изоляцией во многих электротехнических конструкциях: в трансформаторах, конденсаторах, на линиях электропередач – служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с электрической прочностью большинства жидких и твердых диэлектриков.

В любом газе, в том числе и в воздухе, содержится небольшое число положительных и отрицательных ионов и свободных электронов, которые, как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. При подключении электрического поля заряженные частицы получают некоторую добавочную скорость и начинают перемещаться в направлении поля или в противоположном направлении – в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица газа, двигаясь, приобретает дополнительную энергию  $W_{\text{ч}}$ :

$$W_{\text{ч}} = qU_{\lambda}, \quad (1.14)$$

где  $q$  – заряд частицы;  $U_\lambda$  – падение напряжения на длине свободного пробега частицы  $\lambda$ .

Если поле достаточно однородно (однородное поле образуется между двумя плоскими электродами с закругленными краями или между двумя полусферами), то можно принять  $U_\lambda = E\lambda$ . Отсюда

$$W_{\text{ч}} = qE\lambda, \quad (1.15)$$

где  $E$  – напряженность однородного электрического поля.

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается нейтральным молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, то происходит возбуждение атомов и молекул или даже ионизация последних (распад на положительные и отрицательные ионы). Условие, определяющее возможность ударной ионизации,

$$W_{\text{ч}} \geq W_{\text{и}}, \quad (1.16)$$

и с учетом (1.15)

$$qE\lambda \geq W_{\text{и}}, \quad (1.17)$$

где  $W_{\text{и}}$  – энергия, необходимая для ударной ионизации данного газа.

Если условие (1.17) не выполняется, то при соударении заряженной частицы с нейтральной молекулой последняя будет просто переходить в возбужденное состояние. В свою очередь, возбужденная молекула будет отдавать свою избыточную энергию в форме излучения – фотона. Фотон поглощается другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Это явление называется фотонной ионизацией. Она приводит к быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа (рис. 1.21).

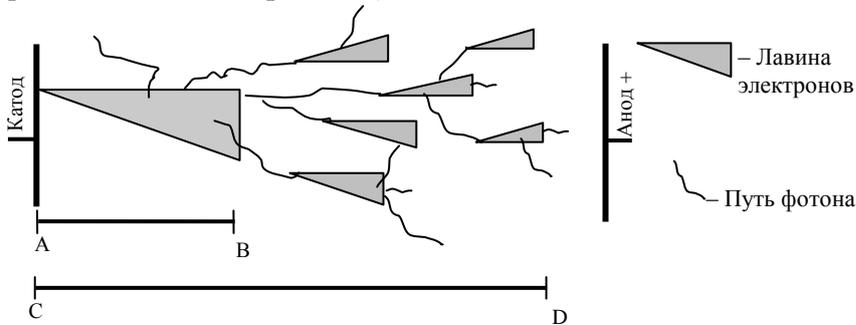


Рис. 1.21. Развитие пробоя в газообразном диэлектрике

Пока свободные электроны летят к аноду, образуя основную лавину, фотоны обгоняют эту лавину и где-то впереди неё ионизируют нейтральные молекулы газа, образуя новые лавины (рис. 1.21). Таким образом, пока основная лавина растет на длину отрезка А-В, канал с повышенной проводимостью распространяется на длину С-Д. Далее отдельные лавины, нагоняя друг друга, сливаются воедино и образуют сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с этим образуется аналогичный лавинообразный поток положительно заряженных частиц, направленный от анода к катоду. То есть, можно сказать, что область между электродами превращается в проводящую плазму и возникает пробой газа. Между электродами по диэлектрику начинает протекать электрический ток. Диэлектрик становится проводником.

### Рассмотрим факторы, влияющие на характеристики пробоя газов.

#### 1. Расстояние между электродами.

При малых расстояниях  $h$  между электродами наблюдается значительное повышение электрической прочности воздуха (рис. 1.22).

Это явление объясняется трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами, т.к. в этом случае уменьшается длина свободного пробега  $\lambda$  и, следовательно, чтобы выполнялось условие ионизации (1.17), необходимо увеличивать напряженность электрического поля.

#### 2. Давление в газе.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от давления  $P$  (рис. 1.23). При малых изменениях  $P$  и  $t^0$  пробивное напряжение  $U_{\text{пр}}$  пропорционально относительной плотности газа:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta, \quad (1.18)$$

где  $U_{\text{пр}0}$  = пробивное напряжение при нормальных условиях ( $P = 0,1$  МПа,  $t^0 = 20$  °С);  $\delta$  – относительная плотность воздуха при н.у.  $\delta = 1$ .

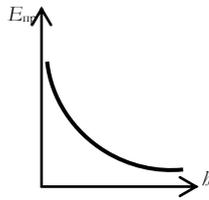


Рис. 1.22. Зависимость  $E_{пр}$  от  $h$  для газообразного диэлектрика

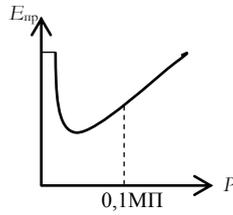


Рис. 1.23. Зависимость  $E_{пр} = f(P)$  для газообразного диэлектрика

При больших давлениях и, следовательно, высоких плотностях газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше, уменьшается длина свободного пробега. Отсюда по условию (1.17), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность электрического поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности. Когда же давление доходит до некоторого предела (опускается ниже атмосферного) и разрежение становится существенным, электрическая прочность снова начинает увеличиваться. Это объясняется снижением числа молекул газа в единице объема и, следовательно, уменьшением вероятности столкновения электронов с нейтральными молекулами и их ионизацией.

При давлении, близком к нулю, газ по своему состоянию приближается к вакууму. Заряженных частиц практически нет, однако пробой вакуума тоже возможен вследствие вырывания электронов с поверхности электродов. При этом электрическая прочность газа достигает очень высоких пределов.

### 3. Степень неоднородности электрического поля.

Неоднородное поле образуется между электродами системы «игла-игла», «игла-плоскость», между двумя сферическими поверхностями, расположенными на большом расстоянии друг от друга. Силовые линии поля в межэлектродном промежутке распределены неравномерно, и поэтому напряженность электрического поля в разных точках различна. В связи с этим пробой начинает развиваться в тех точках, где напряженность достигает максимальных значений. Таким образом, закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от тех, что наблюдаются при пробое в однородном поле. Разрядные процессы в неоднородном поле протекают более интенсивно, пробой происходит при меньшем напряжении, а электрическая прочность диэлектрика в неоднородном поле всегда меньше, чем в однородном (рис. 1.24).

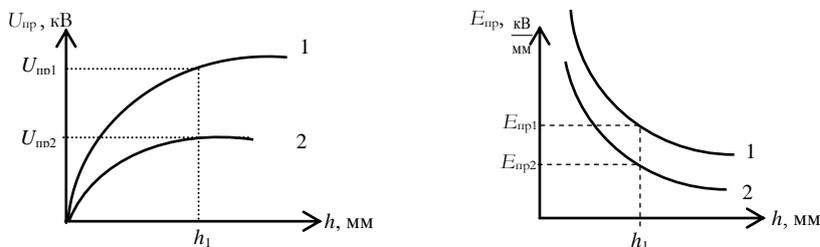


Рис. 1.24. Зависимости пробивного напряжения и электрической прочности от расстояния между электродами: 1 – однородное электрическое поле; 2 – неоднородное электрическое поле

Кроме того, при конфигурации электродов «игла-плоскость» характеристики пробоя зависят также от полярности электродов.

В случае положительной полярности иглы и отрицательной – плоскости пробой происходит при меньшем напряжении, чем при обратной полярности.

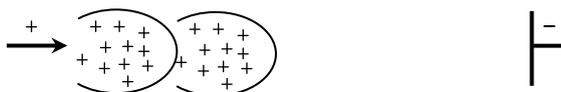


Рис. 1.25. Развитие пробоя в неоднородном электрическом поле

Это объясняется следующим образом. Ионизация газа при любой полярности электродов начинается вблизи иглы, т.е. там, где присутствует большая напряженность электрического поля. В результате ионизации вблизи электрода образуется «облако» заряженных ионов. При положительной полярности иглы этот объемный заряд имеет положительную полярность (1.25) и служит как бы про-

должением иглы, за счет чего сокращается протяженность межэлектродного промежутка. Под действием приложенного напряжения положительный объемный заряд отталкивается и уходит от положительно заряженной иглы. Однако более подвижные электроны, обуславливающие процесс ионизации, все время успевают его восстанавливать, т.е. получается непрерывное «прорастание» положительного объемного заряда, связанного с иглой, в сторону отрицательно заряженной плоскости. Поэтому пробой происходит при меньшем напряжении, нежели в случае обратной полярности электродов.

### 2.7.3. Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики отличаются более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях. Пробой жидких диэлектриков определяется в основном наличием примесей. Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно трудно, а в некоторых случаях практически невозможно. Постоянными примесями в жидких диэлектриках являются вода, газы и твердые частицы.

Вода в виде отдельных мелких капелек, находящихся, например, в трансформаторном масле, при нормальной температуре значительно снижает электрическую прочность  $E_{пр}$  (рис. 1.26). Под влиянием электрического поля капельки воды – сильно дипольной жидкости – поляризуются, притягиваются друг к другу, создавая цепочки с повышенной проводимостью, по которым и проходит пробой.

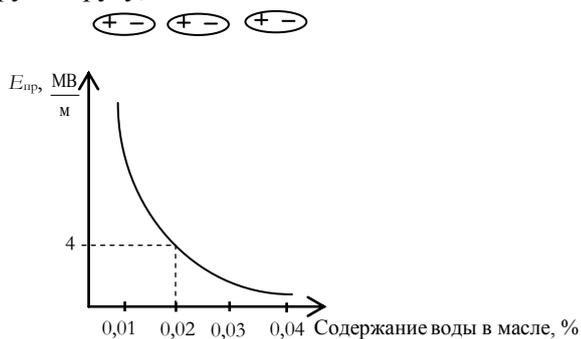


Рис. 1.26. Зависимость  $E_{пр}$  трансформаторного масла от влажности

Электрическая прочность  $E_{пр}$  подсушенного масла не зависит от температуры, если она не выше  $80^{\circ}\text{C}$  (рис. 1.27, зависимость 1). При более высокой температуре масло начинает закипать, происходит образование большого числа пузырьков газа внутри него, в результате чего его электрическая прочность начинает снижаться.

Наличие воды в масле снижает его электрическую прочность  $E_{пр}$  при нормальной температуре (зависимость 2). Повышение  $E_{пр}$  при увеличении температуры в пределах от  $0^{\circ}$  до  $80^{\circ}\text{C}$  обусловлено переходом воды из состояния эмульсии в состояние молекулярного раствора. При  $t > 80^{\circ}\text{C}$  масло начинает закипать, закипает и содержащаяся в масле вода, за счет чего газообразование происходит более интенсивно, чем в сухом масле, и электрическая прочность снижается быстрее (сравни с графиком 1).

Повышение  $E_{пр}$  при  $t < 0^{\circ}\text{C}$  связано с увеличением вязкости масла и снижением диэлектрической проницаемости льда по сравнению с диэлектрической проницаемостью воды.

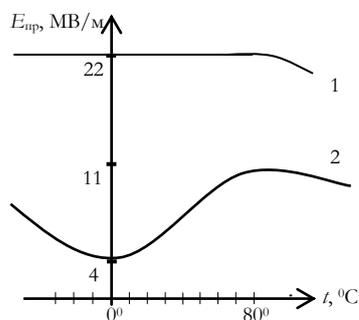


Рис. 1.27. Зависимость  $E_{пр}$  трансформаторного масла от температуры

Сажа, обрывки волокон искажают электрическое поле внутри жидкости, делают его более неоднородным, что также приводит к снижению электрической прочности жидких диэлектриков.

Так, например, неочищенное трансформаторное масло имеет  $E_{пр} \approx 4$  МВ/м, после тщательной очистки  $E_{пр} \approx 20 \dots 25$  МВ/м.

#### 2.7.4. Пробой твердых диэлектриков

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Различают четыре вида пробоя твердых диэлектриков:

- 1) электрический пробой однородных диэлектриков;
- 2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;
- 3) тепловой пробой;
- 4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля (постоянное или переменное, импульсное, высокой или низкой частоты); наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; от условий охлаждения; времени воздействия напряжения и т.д.

**Электрический пробой однородных диэлектриков.** Данный вид пробоя характеризуется весьма быстрым развитием ( $10^{-7} \div 10^{-8}$  с). При этом электрический пробой является чисто электронным процессом: из немногих начальных свободных электронов создается электронная лавина. Такой пробой имеет место, когда в диэлектрике не может быть диэлектрических потерь и отсутствует ионизация газовых включений.

Для однородных материалов (например, стекла) наблюдается заметная разница между значениями пробивного напряжения в однородном (1) и неоднородном (2) электрических полях (рис.1.28).

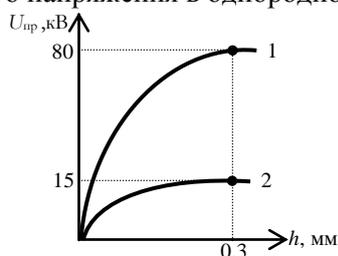


Рис. 1.28. Зависимость  $U_{пр}$  от однородности электрического поля для неорганического стекла

**Электрический пробой неоднородных диэлектриков.** Такой пробой характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения (пузырьки воздуха). Примером неоднородного диэлектрика является фарфор. Пробой в неоднородном диэлектрике развивается также весьма быстро (за  $10^{-7}$  с). Пробивные напряжения, как правило, невысоки (рис. 1.29), в однородных (1) и неоднородных электрических полях (2) почти одинаковы.

С увеличением толщины неоднородных диэлектриков возрастает количество примесей и газовых включений на единицу объема, что приводит к падению  $E_{пр}$ .

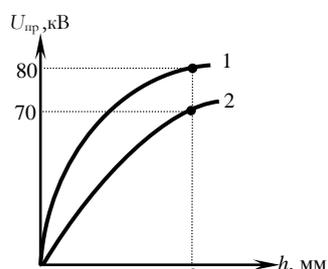


Рис. 1.29. Зависимость  $U_{пр}$  от однородности электрического поля для фарфора

Пониженной электрической прочностью обладают неоднородные диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево):  $E_{пр} \approx 3 \div 7$  МВ/м. Твердые диэлектрики с закрытыми порами (плотная керамика, пластмассы) имеют большую электрическую прочность:  $E_{пр} \approx 100 \div 200$  МВ/м. Величина  $E_{пр}$  у пропитанной бумаги до 300 МВ/м.

**Тепловой пробой.** Электрическая прочность твердых диэлектриков не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение  $E_{пр}$  за счет теплового пробоа (рис. 1.30).

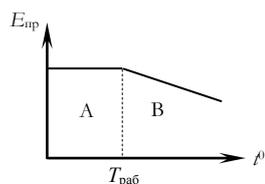


Рис. 1.30. Зависимость  $E_{пр} = f(t^\circ)$  для твердых диэлектриков: А – область электрического пробоа; В – область теплового пробоа

Под действием приложенного напряжения в диэлектрике возникают диэлектрические потери, приводящие к его нагреву. В результате повышения температуры в нем начинают протекать химические реакции, приводящие к изменению структуры и свойств материала. Характеристики диэлектрика постепенно ухудшаются. Процесс снижения характеристик материала под действием повышенных температур называется **тепловым старением** диэлектрика.

Темпы теплового старения изоляции определяют по формуле

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = 2^{\frac{(T_1 - T_2)}{\Delta T}}, \quad (1.19)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – сроки службы соответственно при температуре  $T_1$  и  $T_2$ ;  $\Delta T$  – повышение температуры, вызывающее сокращение службы изоляции в 2 раза.

Процесс теплового старения завершается тепловым пробоем диэлектрика.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, которое может рассеиваться в данных условиях. При этом нарушается тепловое равновесие, а процесс приобретает лавинообразный характер.

Явление теплового пробоа сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих его расплавлению и обугливанию. Как показано на рис. 1.30,  $E_{пр}$  при тепловом пробое резко падает с ростом температуры.

Для ограничения темпов теплового старения изоляционных конструкций и обеспечения требуемых сроков их службы для разных видов диэлектриков устанавливают свои предельно допустимые рабочие температуры  $T_{раб}$ .

**Электрохимический пробой твердого диэлектрика.** Электрохимический пробой имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоа проявляется при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале протекают процессы, вызывающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции (путем ее окисления и т.д.). Для развития электрохимического пробоа требуется длительное время – месяцы, годы. Электрохимический пробой во многом зависит от материала электродов.

Любой вид пробоа твердого диэлектрика приводит к необратимой потере диэлектрических свойств.

## Тема 2.8. Классификация диэлектрических материалов

**Диэлектрические материалы** – это электроизоляционные материалы, предназначенные для изоляции токоведущих частей, находящихся под разными потенциалами друг от друга и от окружающей среды. Они не допускают протекания электрического тока по каким-либо нежелательным путям.

Понятно, что даже самое простое электрическое устройство не может быть выполнено без использования диэлектрика. Диэлектрики образуют самый многочисленный тип электротехнических материалов. Все рассмотреть практически невозможно. Поэтому далее будут рассмотрены лишь наиболее типичные и широко распространенные виды электроизоляционных материалов, приведены их основные параметры, характеристики, области применения.

Электроизоляционные материалы подразделяются:

1) по агрегатному состоянию:

– жидкие (нефтяные масла – трансформаторное, конденсаторное, кабельное);

- твердые (стекла, керамика, бумага, картон, слоистые пластики);
- газообразные (воздух, водород, азот);
- твердеющие (особая группа) – в исходном состоянии, когда вводятся в изготавливаемую изоляцию, являются жидкостями, но затем отвердевают и в готовой изоляции представляют собой твердые тела (смолы, лаки, компаунды);

2) по химической природе:

- органические (соединения углерода);
- неорганические (не содержащие углерода).

Органические обладают ценными механическими свойствами, гибкостью, эластичностью, но имеют относительно низкую нагревостойкость. Неорганические не обладают гибкостью, эластичностью, часто хрупки; технология их обработки сравнительно сложна. Однако у них более высокая нагревостойкость, чем у органических.

Существуют также диэлектрики со свойствами, промежуточными между свойствами органических и неорганических материалов: это элементоорганические материалы. В их состав входит углерод, но не в качестве основного элемента, а только в качестве радикала.

## Тема 2.9. Газообразные диэлектрики

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

**Воздух.** Среди газообразных диэлектриков прежде всего должен быть упомянут воздух, который в силу своей распространенности и доступности часто входит в состав электрических устройств и играет в них роль электроизоляции, дополнительной к твердым и жидким изоляционным материалам. А для проводов воздушных линий он служит единственной изоляцией. Электрическая прочность воздуха при нормальных условиях невелика, поэтому электроустановки, заполненные им, имеют большие габаритные размеры. Недостатком воздуха является также то, что он содержит кислород, следовательно, окисляет изоляцию и все, с чем соприкасается.

**Азот** имеет практически одинаковую с воздухом электрическую прочность и поэтому нередко применяется вместо воздуха для заполнения газовых конденсаторов и для других целей, т.к. не содержит кислорода.

**Шестифтористая сера ( $SF_6$  – элегаз).** Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза выше, чем у воздуха, но при этом элегаз почти в 5 раз тяжелее его. Элегаз нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Применяется в конденсаторах, кабелях, а также в высоковольтных выключателях, где играет роль не только изоляции, но и дугогасящей среды.

**Водород.** Значительный интерес для электротехники представляет водород. Это очень легкий газ, обладающий весьма благоприятными свойствами для использования его в качестве охлаждающей среды вместо воздуха (характеризуется высокой теплопроводностью).

Водород используют в качестве изоляции и одновременно охлаждающей среды в мощных турбогенераторах, синхронных компенсаторах. Водород закачивают в полость между ротором и статором. Предварительно на подшипниках устанавливают запоры, чтобы водород не смешивался с внешним воздухом и не образовывалась «гремучая» смесь. Для этого же внутри машины поддерживают избыточное давление 0,3–0,4 МПа. При утечке водорода из двигателя его объем восполняется подачей из баллона.

Использование водорода позволяет уменьшить потери на трение и вентиляцию. Замедляется окисление изоляции ввиду отсутствия кислорода и устраняется опасность пожара при коротком замыкании внутри машины (водород не поддерживает горения).

**Угольный ангидрид ( $CO_2$  – сухой лёд)** используется для создания в электроустановках низких температур.

## Тема 2.10. Жидкие диэлектрики

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25 час).

### 2.10.1. Нефтяные масла

**Трансформаторное масло.** Из всех жидких электроизоляционных материалов трансформаторное масло находит наибольшее применение в электротехнике. Основная область применения: заливка силовых трансформаторов. При этом масло выполняет двойную роль: во-первых, оно значительно повышает электрическую прочность изоляции  $E_{пр}$ ; во-вторых, улучшает отвод теплоты, выделяемой за счёт потерь в обмотках и магнитопроводе трансформатора (отводит теплоту в 25–30 раз лучше, чем воздух).

Ещё одна область применения трансформаторного масла – масляные выключатели высокого напряжения. В этих аппаратах оно играет роль изоляции и дугогасящей среды. Дуга, горящая между разводящимися контактами выключателя, имеет высокую температуру, вследствие чего масло начинает разлагаться, выделяя газы, не поддерживающие горения, что способствует гашению дуги. Кроме того, интенсивное газообразование приводит к увеличению давления внутри выключателя, что, в свою очередь, ускоряет процесс гашения дуги.

Трансформаторное масло может использоваться для заливки вводов высокого напряжения, трансформаторов тока и напряжения, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов. Его применяют также для пропитки пористых материалов с целью повышения их электрической прочности.

Получают трансформаторное масло путем перегонки нефти, затем тщательно очищают от примесей, промывают водой и сушат.

Трансформаторное масло – это жидкость от почти бесцветной до темно-жёлтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов. Так как масло изготавливается из нефти, следовательно, это горючая жидкость. Одна из основных его характеристик – температура вспышки:  $t_{всп} = 140^{\circ}\text{C}$ . Температура застывания масла до минус  $70^{\circ}\text{C}$ . Электрическая прочность  $E_{пр} = 12 \dots 20$  МВ/м (ГОСТ). На нее сильно влияют влага и твердые волокна. Вода легко может попасть в трансформаторное масло при его перевозке, хранении, переливке в недостаточно просушенную тару и т.д. Поэтому перед началом эксплуатации его подвергают сушке и очистке. Для сушки трансформаторного масла используют несколько способов:

- пропускание под давлением сквозь фильтровальную бумагу;
- центрифугирование. Вода имеет плотность больше, чем у масла, в связи с этим масло при вращении центрифуги остаётся в центре, вода отталкивается к стенкам и сливается;
- обработка трансформаторного масла адсорбентами. Адсорбенты – это вещества, которые обладают пористой поверхностью и при соприкосновении с трансформаторным маслом поглощают из него воду и различные полярные примеси. Чаще всего с этой целью применяется искусственный адсорбент – силикагель;
- распыление в азотной камере.

После сушки и очистки характеристики масла восстанавливаются. Однако в процессе эксплуатации трансформаторное масло неизбежно стареет. В нем образуются загрязняющие его продукты – кислоты и смолы. Часть из них растворимы, а часть – нет. Нерастворимые продукты разложения оседают на дне бака и на различных деталях, значительно ухудшая отвод теплоты от них. Кислоты разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию металла. От этого скорость старения масла возрастает. Кроме того, темпы старения увеличиваются в результате:

- доступа воздуха (т.к. воздух содержит кислород  $\text{O}_2$ );
- увеличения температуры ( $T_{\text{раб}}^{\text{max}} = 95^{\circ}\text{C}$ );
- соприкосновения масла с некоторыми металлами (Си, Fe, Pb);
- воздействия света;
- воздействия электрического поля.

Масла различного происхождения обладают различной стойкостью к старению.

Удаление из масла продуктов старения и восстановление его исходных свойств называется *регенерацией*. Достигается она обработкой трансформаторного масла адсорбентами.

Применяют и другие мероприятия для замедления старения масла. Так, воздух над уровнем масла в трансформаторах сообщается с наружным воздухом через воздухоочистительные фильтры. Эти фильтры заполнены силикагелем и поглощают из воздуха влагу, пыль и химически активные загрязнения. Часто вместо воздуха промежутки над маслом в баке заполняют азотом.

Помимо трансформаторного масла в электротехнических установках применяются и другие виды нефтяных электроизоляционных масел.

**Конденсаторное масло** служит для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых. При пропитке бумажного диэлектрика повышается его электрическая прочность:

$E_{пр} = 3\text{--}7$  МВ/м – непропитанная бумага;

$E_{пр} = 300$  МВ/м – пропитанная маслом бумага.

Увеличение электрической прочности бумаги путем пропитки ее конденсаторным маслом дает возможность уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость конденсатора при заданном рабочем объёме, частоте и ёмкости. Различают два основных вида конденсаторных масел:

– нефтяное конденсаторное масло (НКМ), которое получают путем обработки трансформаторного масла в вакууме, в результате этого снижаются его диэлектрические потери:  $\text{tg}\delta = 0,002$  ( $f = 1$  кГц);  $t_{\text{застыв}} = -45^{\circ}\text{C}$ ;  $\epsilon_r = 2,1 \dots 2,3$ ;

– вазелиновое конденсаторное масло. Имеет  $t_{\text{застыв}} = -5^{\circ}\text{C}$ , в остальном близко к НКМ.

Электрическая прочность конденсаторных масел не менее 20 МВ/м.

**Кабельные масла** используются в производстве силовых электрических кабелей. Пропитка бумажной изоляции этих кабелей повышает ее электрическую прочность, а также способствует отводу теплоты. Кабельные масла бывают разных типов.

Для пропитки изоляции силовых кабелей на  $U_{\text{НОМ}}$  до 35 кВ включительно применяют масло марки КМ-25 с  $t_{\text{застыв}} = -10^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{вспышки}}$  более  $+220^{\circ}\text{C}$ .

Для заливки маслonaполненных кабелей на  $U_{\text{НОМ}} = 110 \dots 220$  кВ применяют масло МН-4 с  $t_{\text{застыв}} = -45^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{вспышки}}$  более  $+135^{\circ}\text{C}$ .

В кабелях высокого давления применяются масла марки С-200 с  $t_{\text{застыв}} = -30^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\text{вспышки}} \approx 220^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{tg}\delta = 0,003$ .

Вышеперечисленные нефтяные масла (трансформаторные, конденсаторные, кабельные) обладают преимуществами: они дешёвы, могут производиться в больших количествах, при хорошей очистке их  $\text{tg}\delta$  уменьшается, а  $E_{\text{пр}}$  достаточно высока. Однако в некоторых случаях требуется обеспечить ещё и пожарную безопасность, и взрывобезопасность. Нефтяные масла – горючие жидкости, и говорить о безопасности сложно. В таких ситуациях применяются синтетические жидкие диэлектрики.

### 2.10.2. Синтетические жидкие диэлектрики

К **синтетическим жидким диэлектрикам** относят:

- хлорированные углеводороды;
- фтороорганические жидкости;
- кремнийорганические жидкости.

Синтетические жидкие диэлектрики обладают повышенными свойствами по сравнению с нефтяными маслами:

$\epsilon_r = 39$  (положительный фактор для конденсаторов);

$\text{tg}\delta = 0,0001$  (при  $\delta = 1$  кГц).

Они не горючи. Обладают высокой нагревостойкостью.

Их недостатки: высокая стоимость и сложная технология изготовления.

## Тема 2.11. Твердеющие диэлектрики

### 2.11.1. Смолы

**Смолы** – обширная группа материалов, сходных по химической и физической природе. Это сложные смеси органических веществ, главным образом высокомолекулярных. При достаточно низких температурах это аморфные, стеклообразные массы, более или менее хрупкие. При нагреве смолы размягчаются, становятся пластичными, а затем переходят в жидкое состояние. Смолы большей частью нерастворимы в воде, но растворимы в органических растворителях.

Смолы широко применяются в виде составной части лаков, компаундов, пластмасс и т.д. По своему происхождению смолы подразделяются на природные, искусственные и синтетические.

**Природные смолы.** Природные смолы представляют собой продукты жизнедеятельности животных организмов или растений смолоносов. Их получают практически в готовом виде, подвергают лишь очистке и переплавке. К природным смолам относятся, например, шеллак, канифоль, копалы.

**Канифоль** – смола, получаемая из живицы (природной смолы сосны) после отгонки из неё скипидара. Хрупкая, цветом от светло-желтого до темно-коричневого. Растворима в нефтяных и растительных маслах, спирте, скипидаре. Ее электрическая прочность составляет 10...15 МВ/м.

Канифоль, растворенная в нефтяных маслах, применяется при изготовлении пропиточных и заливочных кабельных компаундов.

**Шеллак** – смолянистые выделения некоторых насекомых. Растворяется в этиловом спирте и применяется в качестве спиртовых растворов в производстве слюдяных изделий;  $t_{\text{плавл}} = 80 \dots 85^{\circ}\text{C}$ .

**Копалы** – остатки деревьев-смолоносов, сгнивших под землей. Это тугоплавкие смолы с большой твердостью и сравнительно труднорастворимые. Используются как добавки к масляным лакам, увеличивающие их твердость.

Наибольшее применение в электротехнике имеют синтетические смолы.

**Синтетические смолы** делятся на полярные и неполярные. К полярным относятся фенолформальдегидные, полиэфирные, эпоксидные и кремнийорганические смолы, полиметилметакрилат, поливинилхлорид.

*Фенолформальдегидные смолы* производятся путем нагрева в закрытом котле водного раствора фенола и формальдегида в присутствии катализатора. Один из представителей этого вида смол – бакелит. Его электрическая прочность составляет 10...20 МВ/м.

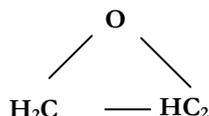
Бакелит имеет ряд отрицательных свойств:

- обладает низкой эластичностью;
- при высоких напряженностях электрического поля на его поверхности образуются токопроводящие пути.

Применяют бакелит для пропитки дерева и других пористых материалов, при изготовлении гетинакса, текстолита, пластмасс.

*Полиэфирные смолы* – продукты поликонденсации различных спиртов и кислот. Один из них – глифталевая смола. Для ее застывания требуется большая температура. Она имеет более высокую эластичность и большую стойкость к тепловому старению по сравнению с бакелитом. Ее электрическая прочность составляет 25 МВ/м.

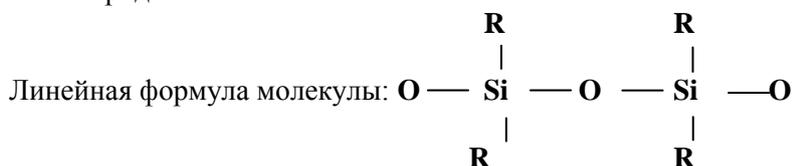
*Эпоксидные смолы* характеризуются наличием в их молекуле эпоксидных «колец»:



Имеют высокую электрическую прочность:  $E_{\text{пр}} = 20 \dots 80$  МВ/м.

Эпоксидные смолы в чистом виде термопластичны (с повышением температуры размягчаются). При добавлении к ним отвердителя сравнительно быстро отвердевают и становятся термореактивны (затвердев один раз, больше не размягчаются при повышении температуры). Большим преимуществом эпоксидных смол является сравнительно малая усадка при отвердевании (0,5–2,0%), что позволяет получить монолитную изоляцию. Обладают высокой нагревостойкостью. Однако многие эпоксидные смолы токсичны и вызывают кожные заболевания. Отвердевшие эпоксидные смолы уже не токсичны.

*Кремнийорганические смолы.* В их состав, кроме характерного для органических соединений углерода, входит кремний. Углерод входит только в виде радикала, поэтому такие смолы относятся к элементоорганическим диэлектрикам. Основу строения их молекул составляет связь между кремнием и кислородом.



(R – органический радикал: метил, этил, фенил и т.д.)

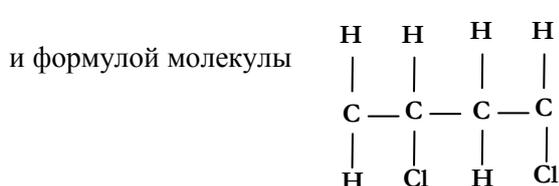
Связь – Si–O – более прочная, чем связь – C–C –, что и определяет более высокую нагревостойкость кремнийорганических полимеров. Их электрическая прочность – 25 МВ/м.

Кремнийорганические полимеры используются в лаках, компаундах, пластмассах. Некоторые из них весьма эластичны. Они могут применяться и в виде жидкостей. Электроизоляционные свойства кремнийорганических соединений достаточно высоки и сохраняются даже при повышенных температурах. Они не смачиваются водой и остаются эластичными при низких температурах. Однако сравнительно дороги. К тому же кремнийорганические смолы имеют, как правило, невысокую механическую прочность.

*Полиметилметакрилат* (плексиглас, оргстекло) – прозрачный материал с электрической прочностью до 35 МВ/м,  $\epsilon_r = 3,5 \dots 4,5$ . Оргстекло не смачивается водой и не впитывает её. Применяется как диэлектрик и как дугогасящая среда. Высокая температура дуги приводит к разложению материала, выделению воды и негорючих газов ( $\text{H}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$ ), что способствует гашению дуги.

Применяется в высоковольтных выключателях, в защитных разрядниках.

*Поливинилхлорид* – непрозрачный белый или желтоватый материал с электрической прочностью 25 МВ/м

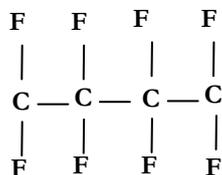


Это гибкий материал, не впитывающий воду и стойкий к действию органических растворителей.

Применяется для изоляции проводов и токоведущих жил кабелей.

К неполярным синтетическим смолам относится *политетрафторэтилен* (фторопласт-4, тефлон). Этот материал обладает очень высокой нагревостойкостью:  $T_{\text{раб}} = 240 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , высокой эластичностью, которую сохраняет даже при низких температурах (при  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В очень тонком слое сохраняет эластичность при  $t = -100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Имеет следующие характеристики:  $\rho = 1016 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\text{tg } \delta = 0,001 \dots 0,003$ ;  $E_{\text{пр}} = 30 \text{ МВ/м}$ .

Линейная формула молекулы



Политетрафторэтилен не смачивается водой, не впитывает её, стоек к действию агрессивных сред (спиртов, кислот, щелочей).

Считается одним из самых высококачественных диэлектриков, поэтому применяется в особо ответственных случаях, когда на изоляцию одновременно воздействуют высокие напряжения, резкие перепады температур, влажные и различные агрессивные среды.

Его недостатки:

- при сильном нагреве ( $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) начинает выделять ядовитый газ фтор;
- имеет высокую стоимость материала.

### 2.11.2. Лаки

**Лаки.** Лаками называются жидкие материалы, которые являются растворами пленкообразующих веществ в летучих растворителях. После испарения растворителя пленкообразующее вещество застывает и становится диэлектриком.

Электроизоляционные лаки классифицируются по химическому составу и назначению.

По химическому составу они бывают смоляные и маслосодержащие.

*Смоляные лаки* – растворы синтетических, искусственных или природных смол в летучих растворителях. К ним относятся, например, бакелитовые лаки (раствор бакелита в спирте) – пропиточные и клеящие терморезистивные лаки, дающие механически прочную, но малоэластичную и склонную к тепловому старению пленку. Они используются в производстве гетинакса и текстолита, при изготовлении изоляции электрических аппаратов высокого напряжения и т.д.

*Маслосодержащие лаки.* Их основу составляют высыхающие масла. К данному виду лаков относятся:

- масляные лаки. Основа – растительные масла. Это лаки печной сушки. Применяют для производства лакотканей и лакобумаг, а также для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов;
- масляно-битумные лаки. Основа – растительные масла и битум. Имеют черный цвет. Пленки лаков обладают повышенной влагостойкостью и стойкостью к действию растворителей. Применяют для производства лакотканей, а также для пропитки катушек трансформаторов;
- масляно-канифольные лаки. Основа – растительные масла и канифоль. Это лаки холодной и печной сушки (в зависимости от количества канифоли);
- масляно-смоляные лаки, представляющие собой растворы природных и синтетических смол в различных растворителях. Широко применяют для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов и т.д.

По назначению лаки делятся на пропиточные, покрывные, клеящие.

*Пропиточные лаки* предназначены для пропитки пористой изоляции (дерево, бумага, картон, ткань, изоляция обмоток электрических машин и т.д.). После пропитки поры в изоляции оказываются заполненными уже не воздухом, а высохшим лаком, имеющим значительно более высокую электрическую прочность и теплопроводность, чем воздух. Поэтому в результате пропитки повышается пробивное напряжение, увеличивается теплопроводность материала, уменьшается гигроскопичность и улучшаются механические свойства изоляции.

*Покрывные лаки* служат для образования механически прочной, блестящей, влагостойкой пленки на поверхности твердой изоляции. Такая пленка повышает ее поверхностное сопротивление, создает защиту от действия влаги, растворителей и химически активных веществ, а также затрудняет прилипание к изоляции загрязнений. Некоторые покрывные лаки (эмаль-лаки) наносят непосредственно на металл, при этом на его поверхности образуется электроизоляционный слой.

*Клеящие лаки* применяются для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов (например, клейка листочков расщепленной слюды при изготовлении миканитов) или для приклеивания их к металлу.

Лаки и лакокраски пожароопасны, их хранят в закрытой таре, чтобы исключить попадание солнечных лучей. Их электрическая прочность составляет 70...80 МВ/м.

### 2.11.3. Электроизоляционные компаунды

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Компаунды отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя. Они состоят из различных смол, битумов, воска, масел. Могут использоваться как в твердом, так и в полужидком и вязком состояниях.

По назначению компаунды делятся на две основные группы:

- 1) пропиточные, назначение которых аналогично назначению пропиточных лаков;
- 2) заливочные, которые служат для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями в электрических машинах и аппаратах, а также для получения сравнительно толстого покрытия на электротехнических узлах и деталях. Заливочные компаунды используются для защиты изоляции от увлажнений и от действия химически активных веществ, для увеличения разрядного напряжения, улучшения отвода теплоты и т.д.

Наибольшее применение компаунды получили в кабельной технике. В частности, для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей используют в основном пропиточные компаунды, изготавливаемые из нефтяного масла, к которому для повышения вязкости добавляют канифоль или синтетические смолы. Заливочные компаунды применяют для заливки кабельных муфт в местах соединений и разветвлений кабельных трасс. Заливочные кабельные массы состоят из битумов или для более высокого напряжения – из нефтяных масел и канифоли. Весьма распространены эпоксидные заливочные компаунды благодаря своей высокой механической прочности. Залитая таким компаундом муфта может выполняться без металлического кожуха. Важное значение имеют термореактивные полиэфирные компаунды. Однако их главным недостатком является значительная (около 6 %) усадка при застывании.

### Тема 2.12. Твердые диэлектрики

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция с разбором конкретных ситуаций (0,5 час).

#### 2.12.1. Гибкие плёнки

**Гибкие плёнки** – особый вид изделий, изготавливаемых из полимеров с достаточно высокой молекулярной массой, т.е. с большой длиной молекул, и представляющих собой тонкие (толщиной 0,02 мм и менее) прозрачные гибкие плёнки, выпускаемые в рулонах.

Они производятся двумя способами:

- разливкой на гладкую металлическую поверхность раствора полимера;
- разливкой на гладкую, постоянно охлаждаемую поверхность расплавленного полимера.

Гибкие плёнки – это органические материалы, обладающие высокой электрической и механической прочностью и гибкостью. Гибкость плёнки может быть повышена добавлением к ее материалу пластификатора либо вытяжкой плёнки при температуре, превышающей температуру размягчения материала. Электрическая прочность при уменьшении толщины увеличивается, однако у очень тонких плёнок, благодаря влиянию местных неоднородностей, опять падает:

$$E_{\text{пр}} \approx 100 \text{ МВ/м.}$$

Предел механической прочности пленки при растяжении и ее относительное удлинение перед разрывом выше, чем у тех же материалов в толстом слое. Повышают механическую прочность пленки наклеиванием ее на картон, вследствие чего получают *электрокартон* – материал с высокой электрической (благодаря наличию плёнки) и механической (из-за картона) прочностью.

Гибкие плёнки широко применяют для изоляции электрических машин, кабелей, обмоточных проводов, в качестве диэлектриков для конденсаторов и т.д.

В электроустановках низкого напряжения применяются в основном *триацетатные плёнки* для изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, для изоляции обмоточных проводов. Такие пленки не могут использоваться для изоляции машин высокого напряжения, т.к. обладают относительно низкой рабочей температурой:  $T_{\text{раб}} = +90...100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Из полярных плёнок наибольшее применение получили *майлар* и *мелинекс*. Они имеют хорошие электроизоляционные и механические свойства, химически стойки и нагревостойки. Обладают низкими диэлектрическими потерями:  $\operatorname{tg}\delta = 0,007$  (при 50 Гц); имеют более широкий интервал рабочих температур по сравнению с триацетатными пленками:  $T_{\text{раб}} = -60 \dots 150$  °С; предел их механической прочности до 180 МПа.

К наиболее нагревостойким плёнкам относят *полиамидные* и *политетрафторэтиленовые*. Их  $T_{\text{раб}} = 200 \dots 240$  °С.

## 2.12.2. Волокнистые материалы

**Волокнистые материалы** получили широкое применение в электроизоляционной технике из-за своей доступности, дешевизны, легкости механической обработки и достаточно хороших диэлектрических свойств.

*Волокнистые материалы (ВМ)* состоят преимущественно или целиком из частиц удлиненной формы (волокон). К ним относят бумагу, картон, дерево, ткани, шерсть и другие композиционные материалы. Большая часть ВМ – органические вещества – материалы растительного (дерево, хлопчатобумажная ткань, бумага) и животного (шелк, шерсть) происхождения; искусственные материалы, получаемые путем химической обработки целлюлозы; синтетические волокна.

Недостатки ВМ:

- в чистом виде обладают невысокой электрической прочностью;
- имеют низкую теплопроводность (из-за наличия между волокнами промежутков, заполненных воздухом);
- гигроскопичны (легко поглощают влагу, которая проникает в промежутки между волокнами);
- большая их часть – горючие вещества.

Свойства ВМ могут быть существенно улучшены путем их пропитки жидкими и твердеющими диэлектриками.

В тех случаях, когда от ВМ требуется особо высокая нагревостойкость, которую органические материалы обеспечить не могут, применяют неорганические волокнистые материалы на основе стекловолокна и асбеста.

**Дерево** – один из самых распространенных и дешевых растительных волокнистых материалов. Оно обладает хорошими механическими свойствами; легко подвергается механической обработке: пилится, режется, строгается. Прочность дерева в разных направлениях различна – поперек волокон она меньше, чем вдоль. Причем тяжелые породы прочнее чем легкие.

Наиболее широко в электротехнике применяют такие породы, как сосна, береза, бук, граб.

Дерево имеет ряд недостатков:

- 1) высокая гигроскопичность, что резко снижает электроизоляционные свойства дерева при его увлажнении. Кроме того, сначала увлажняясь, а затем, высыхая, дерево коробится и растрескивается и монолитность изоляции нарушается;
- 2) нестандартность свойств дерева даже одной и той же породы; неоднородность свойств – может наблюдаться внутри одного и того же образца из-за наличия сучков, трещин и других дефектов;
- 3) низкая нагревостойкость и даже горючесть.

Свойства дерева улучшаются при пропитке его льняным и трансформаторным маслом и смолами. При пропитке масса дерева возрастает на 60–70 %.

Применяют дерево для изготовления опор воздушных линий электропередач, опорных и крепежных деталей в трансформаторах, приводов выключателей и разъединителей и т.д.

**Бумага.** После обработки древесной целлюлозы, в растворе, содержащем NaOH, получают натронную бумагу, которая обладает повышенной механической прочностью и стойкостью к тепловому старению по сравнению с обычной бумагой.

Наибольшее применение в электротехнике получила кабельная и конденсаторная бумага.

*Кабельная бумага* применяется для изоляции токоведущих жил кабелей. Изготавливается различных марок, обозначаемых буквами (К, КМ, КВ, КВУ, КВМ, КВМУ) и цифрами:

К – кабельная;

М – многослойная;

В – высоковольтная;

У – уплотненная ( $\epsilon_r = 4,3$ ).

Неуплотненная бумага имеет меньшую плотность и соответственно меньшую диэлектрическую проницаемость:  $\epsilon_r = 3,5$ .

Бумага марок К и КМ используется в изоляции кабелей с напряжением до 35 кВ; КВ и КВУ – 35 кВ и выше; КВМ и КВМУ – 110 кВ и выше.

Цифрами в марке бумаги обозначается ее толщина. У кабельных бумаг она колеблется от 15 до 240 мкм.

Из-за малой толщины кабельную бумагу наматывают на токоведущую жилу кабеля в несколько слоев, до определенной толщины в зависимости от класса напряжения. Слабыми местами в этом случае являются промежутки между отдельными слоями, которые могут быть заполнены воздухом. Под действием напряжения в них могут протекать собственные пробои, что, в свою очередь, ведет к разрушению бумажной изоляции.

Для повышения электрической прочности и влагостойкости бумагу пропитывают кабельным вязким маслом или масляно-канифольными компаундами.

*Конденсаторная бумага* в пропитанном виде используется как диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускается двух видов:

- КОН – обычная конденсаторная бумага;
- силКОН – бумага для силовых конденсаторов.

Малая толщина бумаги (от 4 до 30 мкм) позволяет получить высокую емкость конденсатора (т.к. при невысоких напряжениях емкость пропорциональна  $1/d^2$ , где  $d$  – толщина диэлектрика).

Диэлектрическая проницаемость конденсаторной бумаги  $\epsilon_r = 6$ .

Для повышения характеристик конденсаторную бумагу пропитывают конденсаторными маслами либо хлорированными углеводородами.

**Картон.** Картон изготавливают из древесной или хлопковой целлюлозы. Он отличается от бумаги большей толщиной (до 3 мм). Выпускается двух видов:

– воздушный картон – более твердый и упругий, предназначенный для работы на открытом воздухе. Может применяться для изготовления электрокартона;

– масляный картон – более рыхлой структуры, хорошо впитывающий жидкости; пропитанный трансформаторным маслом, он имеет высокую  $E_{пр}$ . Из него могут изготавливаться диэлектрические барьеры, повышающие электрическую прочность изоляции.

**Фибра.** Фибру получают из бумаги, которую пропускают через теплый раствор хлористого цинка ( $ZnCl_2$ ), далее наматывают на стальной барабан до получения слоя нужной толщины, причем отдельные слои бумаги приклеиваются друг к другу, затем срезают с барабана, прессуют и промывают водой для удаления остатков  $ZnCl_2$ , т.к. впоследствии они могут ухудшить ее электроизоляционные свойства.

Окраска фибры зависит от цвета прессуемой бумаги: черная, серая, желтая, красная.

Фибра выпускается двух видов:

- листовая – в виде листов толщиной 0,6...3,0 мм;
- конструкционная – толщиной до 35 мм.

Она имеет невысокие электроизоляционные свойства и значительную гигроскопичность, при этом однако большую механическую прочность. Фибра хорошо обрабатывается, режется, пилится, строгается; размоченная в горячей воде конструкционная фибра может формоваться.

Фибра используется для гашения электрической дуги: при воздействии дуги она разлагается, выделяя большое количество газов, способствующих гашению.

**Текстильные материалы.** Ткани отличаются от бумаги вполне определенным строением – переплетением нитей (в бумаге отдельные волокна расположены по отношению друг к другу неправильно, беспорядочно). Благодаря упорядоченному строению текстильные материалы (ткани, ленты) имеют большую механическую прочность, особенно при перегибе и истирании, и не сильно снижают механическую прочность при увлажнении. Но при этом ткани намного дороже, чем бумага, и обладают меньшей электрической прочностью.

В электротехнике применяются такие ткани, как шелк, бязь, шифон, хлопчатобумажные, синтетические и т.д. Разные ткани имеют разные свойства. Нагревостойкость, гигроскопичность, электроизоляционные характеристики и механические свойства изменяются в широких пределах.

Текстильные материалы используют в качестве защитных покровов и изоляции кабелей, для изоляции обмоточных проводов трансформаторов и двигателей, кроме того, для изготовления лакотканей и текстолитов.

**Лакоткани.** Лакоткань – это гибкий электроизоляционный материал. Пропитанная лаком, она обеспечивает высокую механическую прочность, а лаковая плёнка – высокую электрическую прочность  $E_{пр}$ .

Лакоткань применяют для прокладок, для изоляции в электрических машинах, аппаратах и кабелях (обмотки) и т.д.

Для ее изготовления используют хлопчатобумажную ткань или шёлк. По роду пропиточного лака лакоткани бывают:

- светлые (желтые) – на масляных лаках;
- черные – на масляно-битумных лаках.

Первые стойки к органическим растворителям, но имеют склонность к тепловому старению;  $E_{пр} = 35...50$  МВ/м (если на основе хлопчатобумажной ткани);  $E_{пр} = 55...90$  МВ/м (если на основе шелковой).

Вторые имеют лучшие электроизоляционные свойства; меньше впитывают влагу;  $E_{пр} = 55...60$  МВ/м (если лакоткань на основе хлопчатобумажной ткани). Однако имеют малую стойкость к действию органических растворителей.

### 2.12.3. Слоистые пластики

**Слоистые пластики.** К слоистым пластикам относят текстолит, гетинакс и их разновидности.

*Гетинакс* получают путем горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитовой смолой. Для его производства берется бумага прочная, нагревостойкая. Иногда вместо бакелитовой смолы применяют эпоксидную. Механическая прочность такого материала получается выше.

Диапазон рабочих температур для гетинакса от  $-60^{\circ}$  до  $+105^{\circ}$ С.

Так как гетинакс – слоистый материал, то его свойства в разных направлениях различны:

- электрическая прочность  $E_{пр}$  в направлении, перпендикулярном слоям, равна  $20...40$  МВ/м; вдоль слоев – в 5–8 раз ниже;
- влагостойкость поперек слоев больше, чем вдоль;
- механическая прочность на сжатие поперек слоев больше, чем вдоль;
- механическая прочность на растяжение, наоборот, поперек слоев меньше, чем вдоль.

Недостатком этого материала является то, что он имеет невысокую дугостойкость. Под действием электрического поля большой напряженности на поверхности гетинакса остается науглероженный след, обладающий существенной проводимостью.

Применяют гетинакс для изготовления изолирующих перегородок в распределительных устройствах, щитов измерительных приборов, опорных и крепежных деталей в трансформаторах и т.д.

*Фольгированный гетинакс* используется для изготовления печатных схем (плат) низковольтных цепей аппаратуры. Он представляет собой слоистый пластик, облицованный с одной или двух сторон электролитической красно-медной фольгой.

*Текстолит* аналогичен гетинаксу, но изготавливается из пропитанной и прессованной ткани. В результате этого имеет более высокую механическую прочность (т.к. механическая прочность ткани выше); более стоек к истиранию и раскалыванию; имеет более высокую рабочую температуру:  $T_{РАБ} = 150^{\circ}$ С. Однако обладает несколько меньшей электрической прочностью и примерно в 5–6 раз дороже гетинакса, т.к. стоимость ткани выше стоимости бумаги.

*Текстогетинакс* – комбинированный слоистый пластик с внутренними слоями из пропитанной и прессованной бумаги и наружными – с обеих сторон – из хлопчатобумажной ткани. По своим характеристикам занимает промежуточное положение между гетинаксом и текстолитом.

В тех случаях, когда от диэлектрика требуется высокая нагревостойкость, применяют слоистые пластики на неорганической основе: *асбогетинакс* и *асботекстолит* (на основе асбестовой бумаги); *стеклогетинакс* и *стеклотекстолит* (на основе неорганической стеклянной ткани). Это наиболее нагревостойкие ( $T_{РАБ} = 200^{\circ}$ С), влагостойкие и механически прочные материалы. При этом они плохо подвергаются механической обработке.

### 2.12.4. Неорганические стекла

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Стекла – это неорганические аморфные вещества, представляющие собой сложные системы различных оксидов. По химическому составу стекла подразделяются:

- 1) на щелочные без тяжелых оксидов или с весьма малым их содержанием (оконные, бутылочные);
- 2) щелочные с большим количеством тяжелых оксидов (оптические и электроизоляционные);
- 3) бесщелочные, например, кварцевое стекло (оптические, изоляционные).

Свойства стекол изменяются в широких пределах в зависимости от их состава и режима тепловой обработки:

- удельное сопротивление  $\rho = 10^6...10^{15}$  Ом·м;
- тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,0002...0,01$ ;
- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 3...16$ .

Как все аморфные тела, стекла не имеют резко выраженной температуры плавления и характеризуются температурой размягчения  $t_{\text{разм}} = 400 \dots 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Большинство стекол не смачиваются водой и не впитывают ее. Если в состав стекла входят щелочные оксиды, то чем их больше, тем меньше его влагостойкость. А, например, натриевое стекло ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ) при повышенных температуре и давлении полностью растворяется в воде и образует «жидкое стекло», которое используется в качестве клеящего диэлектрика.

Механическая прочность стекол зависит от вида нагрузки:

- на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 450 \text{ МПа}$ ;
- на изгиб  $\sigma_{\text{изг}} = 70 \text{ МПа}$ ;
- на растяжение  $\sigma_{\text{раст}} = 30 \dots 40 \text{ МПа}$ .

При динамических нагрузках (удары) стекло разбивается.

Электрическая прочность стекол  $E_{\text{пр}}$  мало зависит от их состава и определяется наличием внутри стекла воздушных включений (чем больше воздушных включений, тем меньше  $E_{\text{пр}}$ ). При постоянном напряжении в однородном электрическом поле  $E_{\text{пр}}$  стремится к  $500 \text{ МВ/м}$ ; при переменном напряжении ( $f = 50 \text{ Гц}$ )  $E_{\text{пр}} = 45 \text{ МВ/м}$ .

По назначению стекла подразделяются на четыре группы:

- 1) конденсаторные (для конденсаторов выбираются стекла с наибольшей  $\epsilon$  и с наименьшими диэлектрическими потерями);
- 2) установочные (для изготовления опорных и линейных изоляторов);
- 3) ламповые (для изготовления баллонов осветительных ламп и электронных приборов);
- 4) с наполнителем (пластмасса горячей прессовки из стекла и слюдяного порошка).

**Стеклоэмали.** Стеклоэмали называют стекла, наносимые тонким слоем на поверхность металла и других предметов с целью защиты от коррозии. В качестве электроизоляционного материала они используются для покрытия трубчатых резисторов: на наружную поверхность керамической трубки наносится проволочная обмотка из нихрома или константана, поверх которой наплавляется слой эмали, создающей изоляцию между витками обмотки и окружающими предметами и защищающей обмотку от влаги, загрязнения и окисления кислородом воздуха при высокой рабочей температуре  $T_{\text{раб}}$  (рис. 1.31).



Рис. 1.31. Трубчатый резистор

Стеклоэмали могут также применяться в качестве диэлектрика в некоторых типах конденсаторов.

### 2.12.5. Ситаллы

Ситаллы изготавливают путем кристаллизации силикатных стекол. Они относятся к аморфно-кристаллическим веществам. Изначально имеют аморфное строение, но при определенных условиях переходят в кристаллическое состояние.

По свойствам ситаллы занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой, поэтому их иногда называют стеклокерамикой. В отличие от стекол они менее хрупки и непрозрачны, но в тонком слое заметно пропускают свет.

Ситаллы характеризуются следующими параметрами:

- электрическая прочность  $E_{\text{пр}} = 80 \text{ МВ/м}$ ;
- $\text{tg}\delta = 0,0001 \dots 0,0008$  (при  $f = 1 \text{ МГц}$ );
- механическая прочность на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 1200 \text{ МПа}$ .

Применяются ситаллы для изготовления ответственных изоляционных изделий.

### 2.12.6. Керамические материалы

Керамика – это неорганический диэлектрик. Ранее ее изготавливали из глины, сейчас появились и другие виды керамических материалов, в состав которых глина входит лишь в очень малом количестве или же совсем не входит. Применяемые в электротехнике керамические материалы, состоящие из различных оксидов, в том числе и оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), изготавливаются следующим образом:

их составные части очищают от примесей, размалывают в порошок, перемешивают с водой, формируют, покрывают глазурью и подвергают обжигу.

В зависимости от химического состава свойства керамических материалов изменяются в очень широких пределах, поэтому и области их применения весьма разнообразны. В электротехнике керамику используют в качестве полупроводниковых и магнитных материалов. Керамические материалы могут быть также диэлектриками и сегнетоэлектриками. Большинство керамических диэлектриков имеют высокую механическую прочность, малые диэлектрические потери, значительную нагревостойкость и другие ценные свойства. Керамика обладает стойкостью к электрическому и тепловому старению.

Одним из самых распространенных керамических материалов является *фарфор*. Из-за его пористости поверхность фарфоровых изделий покрывают глазурью, которая защищает фарфор от проникновения влаги внутрь пор. Глазурированные изоляторы могут использоваться в открытых электроустановках, постоянно подвергаясь действию атмосферных осадков. К гладкой глазурированной поверхности менее пристают различные загрязнения и влага; глазурь уменьшает ток утечки  $I_{ут}$  по поверхности изоляторов. Кроме того, «заглаживая» трещины и другие дефекты на поверхности фарфора, она существенно повышает механическую прочность фарфоровых изделий.

Обожженный и глазурированный фарфор имеет следующие характеристики:  $\epsilon_r = 6...8$ ;  $\text{tg}\delta = 0,015...0,025$ ;  $E_{пр} = 10...30$  МВ/м (при  $f = 50$  Гц). Однако при повышении температуры его электроизоляционные свойства ухудшаются.

Механическая прочность фарфора зависит от вида механической нагрузки:

– на сжатие  $\sigma_{сж} = 400...700$  МПа;

– изгиб  $\sigma_{изг} = 80$  МПа;

– растяжение  $\sigma_{раст} = 45$  МПа.

При динамических нагрузках (удары) он разбивается.

Фарфор применяется в электротехнике для изготовления изоляторов воздушных линий, опорных и проходных изоляторов, корпусов вводов высокого напряжения, трансформаторов тока и напряжения, корпусов защитных разрядников и т.д.

### 2.12.7. Слюда и слюдяные материалы

Слюда является важнейшим из природных минеральных электроизоляционных материалов. Благодаря её ценным качествам: высокой электрической и механической прочности, нагревостойкости, влагостойкости и гибкости – слюду применяют в особо ответственных случаях, в частности в качестве изоляции электрических машин высокого напряжения большой мощности (турбогенераторов, гидрогенераторов, тяговых двигателей), а также в качестве диэлектриков в некоторых конденсаторах.

Слюда – это хрупкое слоистое вещество, способное расщепляться на пластинки, называемые «лепестками». Толщина отдельного лепестка может составлять 0,005 мм. В связи со слоистой структурой свойства слюды в разных направлениях будут различны.

По химическому составу различают два вида слюды: мусковит и флогопит.

Мусковит	Флогопит
$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	$K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
$\rho = 10^{12} \dots 10^{16}$ Ом·м	$\rho = 10^{11} \dots 10^{12}$ Ом·м
$\text{tg}\delta = 0,015 (f = 50 \text{ Гц})$	$\text{tg}\delta = 0,05$
$T_{раб} = 200...600$ °С	$T_{раб} = 800...900$ °С

Мусковит более стоек к истиранию, чем флогопит, обладает большей электрической и механической прочностью, большей гибкостью и упругостью.

Слюда не впитывает воду и не смачивается водой, однако при повышенных температурах, превышающих рабочие величины, электроизоляционные свойства слюды ухудшаются, а из нее начинает выделяться вода. При этом слюда вспучивается и коробится.

Плавится слюда лишь при температуре 1145–1400 °С.

На основании слюд получают различные электроизоляционные материалы:

– миканиты;

– слюдиниты;

– слюдопласты.

Слюдиниты и слюдопласты относят к слюдяным бумагам.

**Миканиты** – это материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которая наклеивается с одной стороны (или с обеих сторон), тем самым увеличивая механическую прочность материала и затрудняя отставание лепестков слюды при его изгибе.

Вследствие содержания большого количества слюды (не менее 50 %) миканиты обладают высокой электрической прочностью и нагревостойкостью.

**Слюдиниты** изготавливают из отходов слюды, оставшихся после изготовления миканитов. Пластинки измельчают, подвергают термообработке при температуре 900 °С. При этом кристаллы слюды теряют входящую в их состав воду. В полученную массу добавляют связующее вещество и помещают ее в бумагоделательную машину. Отдельные листы полученной таким образом слюдяной бумаги склеивают между собой с помощью эпоксидных и кремнийорганических смол.

Электрическая прочность слюдинитов в сухом состоянии составляет 15–20 МВ/м.

Главное достоинство этого материала – равномерность свойств по всей площади, высокая механическая прочность и нагревостойкость.

К числу недостатков следует отнести пониженную, по сравнению с миканитами, влагостойкость (разрушаются при соприкосновении с водой или другими полярными жидкостями) и малое удлинение перед разрывом.

### Раздел 3. Проводниковые материалы

*Проводниковыми* называют материалы, хорошо проводящие электрический ток. К ним относятся металлы и сплавы, жидкости, газы при определенных условиях.

#### Тема 3.1. Классификация проводниковых материалов

Основное направление классификации проводниковых материалов – по агрегатному состоянию.

##### 1. Твердые проводники.

Они, в свою очередь, делятся в зависимости от величины проводимости на следующие группы:

– *металлы и сплавы высокой проводимости*. К этой группе относятся проводники, имеющие удельное сопротивление (при нормальной температуре)  $\rho_{уд} \leq 0,05$  мкОм·м. Поскольку такие материалы имеют низкое сопротивление, следовательно, очень хорошо, с наименьшими потерями, проводят электрический ток. Материалы высокой проводимости используются для изготовления проводов, шин, токоведущих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, обкладок в конденсаторах, электрических контактов и т.п.;

– *сплавы высокого сопротивления*:  $\rho_{уд} \geq 0,3$  мкОм·м. Так как данные материалы обладают высоким для проводников сопротивлением, поэтому они предназначены для создания в электрической цепи определенного сопротивления. Их используют для изготовления резисторов, реостатов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.п.;

– *сверхпроводники и криопроводники*. Представляют интерес, т.к. обладают чрезвычайно малым удельным сопротивлением ( $\rho_{уд} \rightarrow 0$ ) при весьма низких температурах.

##### 2. Жидкие проводники.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты (водные растворы различных кислот, щелочей, солей).

Для большинства металлов температура плавления высока. Исключение составляет ртуть, имеющая температуру плавления около  $-39$  °С. Она может использоваться в качестве жидкого металлического проводника и при нормальной температуре, тогда как другие металлы только при повышенных температурах.

Механизм прохождения токов в металле – как в твердом, так и в жидком состоянии – обусловлен движением свободных электронов под действием электрического поля. В электролитах – движением электронов и ионов. Вследствие движения ионов состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

##### 3. Газы и пары.

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотонной ионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной проводимостью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов

числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название плазмы.

### Тема 3.2. Параметры, характеризующие свойства проводниковых материалов

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся:

1. Удельная проводимость  $\gamma$  или ее обратная величина – удельное сопротивление  $\rho$ .

В соответствии с законом Ома ( $I = \gamma E$ ) удельная проводимость  $\gamma$  металлических проводников не зависит от напряженности электрического поля  $E$  при изменении ее в весьма широких пределах:

$$\gamma = 1/\rho, \quad (1.20)$$

$$\rho = RS/l, \quad (1.21)$$

где  $R$  – сопротивление данного образца, Ом;  $S$  – поперечное сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина проводника, м.

Чем меньше у проводника удельное сопротивление, тем он лучше, тем выше его проводимость.

2. Температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha_\rho$ .

Число носителей заряда (концентрация свободных электронов) в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшаются длина свободного пробега электрона  $\lambda$ , подвижность электронов и, как следствие, удельная проводимость, следовательно, увеличивается удельное сопротивление материала:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (1.22)$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления показывает, как увеличивается удельное сопротивление проводника при увеличении температуры на 1 К.

При изменении температуры в узких диапазонах на практике для расчета удельного сопротивления применяют формулу

$$\rho_2 = \rho_1 \left[ 1 + \bar{\alpha}_\rho (T_2 - T_1) \right], \quad (1.23)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельное сопротивление проводникового материала при температуре  $T_1$  и  $T_2$  соответственно (при этом  $T_1 > T_2$ );  $\bar{\alpha}_\rho$  – средний температурный коэффициент удельного сопротивления в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

При значительном изменении температуры, когда вещество переходит из твердого состояния в жидкое, у большинства металлов температурная зависимость сохраняется ( $t^0 \uparrow$ ,  $\rho \uparrow$ ,  $\gamma \downarrow$ ). Исключение составляют галлий, висмут и сурьма, у которых при плавлении сопротивление уменьшается.

3. Коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$ .

За передачу теплоты через металл в основном ответственны те же самые свободные электроны. Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$  металла намного больше, чем диэлектрика. Отсюда также явствует, что чем больше электропроводность  $\gamma$  металла, тем больше должна быть и его теплопроводность,  $\gamma_T$ .

При увеличении температуры подвижность электронов снижается, тогда отношение  $\gamma_T/\gamma$  должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана-Франца-Лоренца:

$$\gamma_T/\gamma = \alpha_0 T, \quad (1.24)$$

где  $T$  – термодинамическая температура, К;  $\alpha_0 = \frac{\pi^2 \cdot k^2}{3e^2}$  – число Лоренца, равное  $2,45 \cdot 10^{-8}$ , В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup>;  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона.

Этот закон выполняется при температуре, близкой к нормальной или несколько повышенной, для большинства металлов (за исключением марганца и бериллия).

4. Контактная разность потенциалов  $\phi_2 - \phi_1$ .

Этот параметр применяется в тех случаях, когда соединяются два различных проводника. Проводники имеют разную концентрацию свободных электронов, и поэтому на месте их соединения образуется некоторая разность потенциалов.

5. Предел механической прочности на растяжение  $\sigma_p$ , МПа.

6. Относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l$ .

Этот параметр показывает, насколько удлиняется проводник, прежде чем окончательно порваться.

7. Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_l$ :

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}. \quad (1.25)$$

Данный коэффициент показывает, как сильно расширяется материал при повышении температуры на 1 К. При нормальной температуре и нормальном давлении легкоплавкие металлы имеют сравнительно высокие значения  $\alpha_l$ ; а тугоплавкие – низкие.

### Тема 3.3. Материалы высокой проводимости

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25час).

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий.

#### 3.3.1. Медь

К достоинствам меди, обеспечивающим её широкое применение, относятся:

- малое удельное сопротивление:  $\rho = 0,0179$  мкОм·м при н.у. (из всех материалов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- достаточно высокая механическая прочность;
- удовлетворительная стойкость к коррозии (медь окисляется на воздухе, даже в условиях высокой влажности, значительно медленнее, чем железо);
- высокая технологичность (медь легко прокатывается в листы и ленты; протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра);
- легкость пайки и сварки.

В качестве проводникового материала в России используют медь двух марок: М1 и М0.

М1 содержит: 99,9 % меди; 0,1 % примесей (0,08 % из них кислород). Кислород, входящий в состав меди, ухудшает ее механические свойства.

М0 содержит: 99,95 % меди, примесей не более 0,05 % (кислорода не более 0,02 %). Из меди М0 может быть изготовлена тонкая проволока.

На свойства меди влияние оказывают не только примеси, но и способ ее термообработки. При холодной протяжке получают твердую медь (МТ), имеющую высокую механическую прочность. Если медь подвергают отжигу, т.е. нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получают мягкую медь (ММ).

Их характеристики:

МТ	ММ
$\rho = 0,0179 \dots 0,0182$ мкОм·м	$\rho = 0,0175$ мкОм·м
$\sigma_p = 390$ МПа	$\sigma_p = 280$ МПа

На величину сопротивления меди влияет температура (рис. 1.29). Ее температура плавления  $1083^\circ\text{C}$ .

Медь применяют для изготовления различных проводов, в том числе обмоточных проводов трансформаторов, двигателей, генераторов; для изготовления токоведущих жил кабелей, проводов воздушных линий электропередач небольшой протяженности, шин в распределительных устройствах, электрических контактов и т.д.

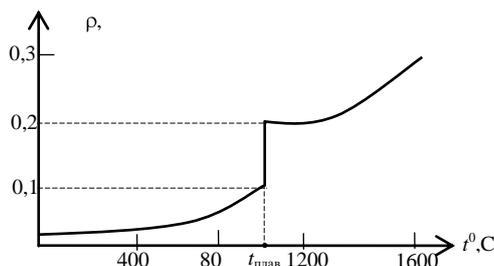


Рис. 1.29. Зависимость  $\rho$  от  $t^\circ\text{C}$  для меди

Применение меди ограничивает ее высокая стоимость и дефицитность. В связи с этим в некоторых случаях вместо чистой меди в качестве проводникового материала используются сплавы на ее основе – *бронзы*.

**Сплавы меди.** В электротехнике применяются сплавы меди с оловом, кремнием, фосфором, магнием, бериллием, хромом, кадмием. Такие сплавы носят название бронз. Сплав меди и цинка – это *латунь*.

При правильно подобранном составе бронзы и латунь имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь. Например, бериллиевая бронза имеет механическую прочность  $\sigma_p = 1350$  МПа.

Однако электропроводность бронз несколько хуже, чем у чистой меди.

В связи с высокой механической прочностью бронзы используют в тех случаях, когда проводник несет не только электрическую, но и высокую механическую нагрузку. Например, бронзы применяют для изготовления токопроводящих пружин, подвижных электрических контактов и т.п.

### 3.3.2. *Алюминий*

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом:  $\rho = 0,029$  мкОм·м (при н.у.).

Его основные характеристики:

$$\sigma_p = 80 \dots 160 \text{ МПа};$$

$$t_{\text{ПЛАВ}} = 675 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta l/l = 18 \text{ } \%$$

Алюминий – представитель легких металлов (примерно в 3,5 раза легче меди). Он обладает пониженными по сравнению с медью свойствами – как механическими, так и электрическими. При одинаковом сечении и длине проводника электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, практически в 1,63 раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно увеличить его сечение в 1,63 раза. Отсюда понятно, что если в электротехническом устройстве ограничены габариты, то замена медного проводника алюминиевым затруднена. Однако при этом алюминиевый проводник менее дефицитен, чем медный.

Для электротехнических целей используют алюминий трех марок:

А1 – 99,5 % алюминия и не более 0,5 % примесей;

АВ00 – 99,97 % алюминия и не более 0,03 % примесей. Алюминий этой марки применяют в основном для изготовления фольги, электродов и корпусов оксидных конденсаторов;

АВ0000 – алюминий наивысшей чистоты, примесей не более 0,004 %.

Разные примеси, входящие в состав алюминия, в различной степени снижают его удельную проводимость. Так, например, добавки: Ni, Si, Zn, Fe (0,5 %) снижают проводимость  $\gamma_{\text{Al}}$  на 2–3 %; Cu, Ag, Mg (0,5 %) – на 5–10 %; Ti, Mn (0,5 %) – на 10 % и выше.

Особенностью алюминия является то, что он очень сильно окисляется на воздухе и покрывается тонкой оксидной плёнкой с большим электрическим сопротивлением. Эта плёнка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но одновременно с этим создает большое переходное сопротивление в местах соединения алюминиевых проводов и, кроме того, делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия применяются специальные пасты – припои или ультразвуковые паяльники.

Из алюминия изготавливают сталеалюминиевые провода воздушной ЛЭП (это основное применение алюминия), помимо этого жилы кабелей, шины в распределительных устройствах и другие токоведущие части электроустановок. Из алюминия путем прокатки получают тонкую (до 6–7 мкм) фольгу для изготовления электродов в бумажных и пленочных конденсаторах.

### 3.3.3. *Железо (сталь)*

Удельное сопротивление железа  $\rho = 0,1$  мкОм·м (при н.у.) – больше, чем у алюминия и меди.

Недостатками железа являются:

– высокое для проводников удельное сопротивление (проводимость железа  $\gamma_{\text{Fe}}$  примерно в 6–7 раз меньше, чем у меди);

– малое удлинение перед разрывом:  $\Delta l/l = 5 \text{ } \%$ ;

– малая стойкость к коррозии даже при нормальной температуре. В условиях повышенной влажности железо быстро ржавеет; при повышении температуры скорость коррозии резко увеличи-

вается. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого к окислению материала. Обычно для этой цели применяют покрытие оловом или цинком;

– при переменном токе в железе как в ферромагнитном материале заметно сказывается поверхностный эффект, поэтому активное сопротивление стальных проводников переменному току выше, чем постоянному. Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках появляются потери мощности на гистерезис;

– за счет того, что железо – магнитный материал, при переменном токе в нем возникают дополнительные потери на намагничивание.

Несмотря на перечисленные недостатки, железо широко применяется в электротехнике благодаря следующим своим достоинствам:

– дешевизна и доступность;

– высокая механическая прочность:  $\sigma_p = 700 \dots 750$  МПа;

– высокая нагревостойкость:  $t_{\text{ПЛАВ}} = 1535$  °С.

В качестве проводникового материала обычно применяют мягкую сталь с содержанием углерода 0,10–0,15 %. Ее используют в качестве материала для изготовления проводов воздушных линий при передаче небольших мощностей на короткие расстояния. Для длинных воздушных линий используют сталеалюминиевые провода, в которых алюминий несет на себе электрическую нагрузку, а стальной сердечник – механическую. Сталь как проводниковый материал применяется также в виде шин в распределительных устройствах, рельсов электрифицированного железнодорожного транспорта и трамваев и т.д.

### 3.3.4. Биметалл

В некоторых случаях для уменьшения расходов цветных металлов в проводниковых конструкциях выгодно применять так называемый проводниковый биметалл. Это сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем металлы соединены друг с другом прочно и непрерывно по всей поверхности их соприкосновения. Биметалл имеет механические и электрические свойства, промежуточные между свойствами сплошного медного и сплошного стального проводника того же сечения. Механическая прочность биметалла больше, чем меди, но электропроводность меньше. В биметалле медь обеспечивает большую проводимость при переменном токе, когда в железе начинает проявляться поверхностный эффект. При этом ток вытесняется на поверхность проводника и протекает по слою меди, обладающей лучшей проводимостью, чем железо. Кроме того, медь, нанесенная на поверхность стали, защищает ее от коррозии.

Биметалл применяют для изготовления проводов воздушных линий, линий связи, проводов на железнодорожном транспорте, контактной сети троллейбусов и трамваев, шин в распределительных устройствах, электрических контактов и пр.

## Тема 3.4. Сверхпроводники и криопроводники

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-диспут (0,25 час).

**Сверхпроводники.** При снижении температуры удельное сопротивление металлических проводников уменьшается. Например, при охлаждении ртути до температуры, приблизительно равной температуре сжижения гелия, сопротивление ртути внезапно, резким скачком уменьшается до чрезвычайно малого, не поддающегося измерению значения, а, следовательно, проводимость возрастает почти до бесконечности. Явление уменьшения сопротивления до весьма низких величин при охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю, называется *сверхпроводимостью*. Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется *температурой сверхпроводимости*  $T_c$ . Ее величина зависит от конкретного материала:

для алюминия  $T_c = 1,2$  К;

для свинца  $T_c = 7,2$  К;

для ниобия  $T_c = 9,4$  К.

Немецкие физики Майснер и Оксенфельд заметили, что сверхпроводники при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние становятся идеальными диамагнетиками (т.е. их относительная магнитная проницаемость резко, скачком падает до нуля).

Следует отметить, что сверхпроводящее состояние обратимо: при повышении температуры сверхпроводимость нарушается и вещество переходит в нормальное состояние с определенным значением проводимости  $\gamma$ .

В настоящее время известно около 35 сверхпроводниковых металлов и более тысячи сверхпроводниковых сплавов и химических соединений. Однако некоторые вещества, обладающие при нормальной температуре весьма малым значением удельного сопротивления (серебро, медь, золото, платина и др.), перевести в сверхпроводящее состояние до сих пор не удается.

Применение сверхпроводниковых материалов в электротехнике открывает широкие перспективы для передачи электроэнергии: благодаря своим свойствам сверхпроводники позволяют передавать электрическую энергию на расстояния совершенно без потерь. Однако создание низких температур и тем самым обеспечение состояния сверхпроводимости до сих пор представляет собой сложную, дорогостоящую задачу. Поэтому в настоящее время сверхпроводники применяются в ограниченном количестве. В частности, они используются для создания сверхпроводниковых электромагнитов, для кабельных линий электропередач больших мощностей на короткие расстояния; в устройствах памяти в вычислительной технике; в подшипниках с «магнитной смазкой», работающих совершенно без трения, и т.д. С этой целью в качестве сверхпроводниковых материалов используются в основном алюминий, ниобий и сплавы на их основе.

**Криопроводники.** *Криопроводимость* – явление значительного снижения удельного сопротивления материала при уменьшении температуры до криогенной величины ( $T_{кр}$ ), но без перехода в сверхпроводящее состояние:

$$T_{кр} < T_c.$$

Например, для алюминия  $T_{кр} = 20$  К. При этой температуре алюминий переходит в криопроводящее состояние и его сопротивление уменьшается в 6 000 раз по сравнению с н.у. ( $t = 20$  °С).

Применение криопроводников вместо сверхпроводников в электромашинах и других устройствах может иметь свои преимущества. Например, использование в качестве хладагента жидкого водорода или жидкого азота значительно упрощает и удешевляет выполнение тепловой изоляции устройств и уменьшает расход мощности на охлаждение.

В качестве криопроводников используют медь, алюминий, серебро, золото.

### Тема 3.5. Сплавы высокого сопротивления

Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25час).

К сплавам высокого сопротивления относят все сплавы с удельным сопротивлением  $\rho \geq 0,35$  мкОм·м.

Они применяются для изготовления образцовых резисторов (в электроизмерительных приборах), реостатов, электроплиток, нагревательных приборов и пр.

К данным сплавам предъявляются следующие требования:

- высокая стабильность сопротивления во времени;
- низкий температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha_p$  (т.е. стабильность характеристик при изменении температуры);
- технологичность (возможность изготовления из них гибкой проволоки, очень тонкой проволоки);
- дешевизна.

Кроме того, они не должны содержать дефицитных компонентов.

Вышеперечисленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют такие сплавы, как манганин, константан, сплавы на основе железа.

#### 3.5.1. Манганин

Манганин – наиболее типичный и широко применяемый для изготовления образцовых резисторов сплав.

Его химический состав: медь Cu – 85 %, марганец Mn – 12 %, никель Ni – 3 %. Большим содержанием меди объясняется желтоватый цвет.

Основные характеристики манганина:

$$\rho = 0,42 \dots 0,48 \text{ мкОм} \cdot \text{м (при н.у.);}$$

$$T_{раб} = 200 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\sigma_p = 600 \text{ МПа};$$

$$\Delta l/l \approx 30 \text{ } \%$$

Манганин обладает высокой технологичностью: может вытягиваться в тонкую проволоку (до  $0,02 \text{ мм}^2$ ); которую при необходимости покрывают эмалевой изоляцией.

### 3.5.2. Константан

Константан – сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. Название «константан» объясняется значительным постоянством сопротивления при изменении температуры.

Механические характеристики константана:

$$\rho = 0,48 \dots 0,52 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.);}$$

$$T_{\text{раб}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\sigma_p = 500 \text{ МПа};$$

$$\Delta l/l \approx 30 \text{ } \%$$

По механическим свойствам константан близок к манганину, но нагревостойкость у него выше. Константан можно применять для изготовления реостатов и электронагревательных элементов, длительно работающих при температуре, равной 450 °С. Константан, однако, не может использоваться в измерительных схемах, т.к. при наличии разности температур в местах контакта константановых проводников с медью возникают термо-ЭДС, которые могут являться источником ошибок при измерениях.

### 3.5.3. Сплавы на основе железа

В состав таких сплавов, кроме железа, могут входить: хром Cr, алюминий Al, никель Ni, вольфрам Wo, молибден Mo, медь Cu и т.д. Их высокая нагревостойкость объясняется большим содержанием металлов, образующих на воздухе сплошную оксидную плёнку (чем больше содержание железа, тем менее нагревостоек сплав).

При обозначении марки сплава на основе железа используются буквы и цифры.

Буква показывает наиболее характерные элементы, входящие в состав сплава: В – вольфрам; Д – медь; Х – хром; Ю – алюминий; Н – никель и т.д.; цифра – приблизительное содержание в нем данного компонента (%). Например: марка Х23Ю5 означает, что сплав содержит Cr – 23 %, Al – 5 %, остальное железо.

Применяются данные сплавы для изготовления резисторов, реостатов, но в основном – для электронагревательных элементов. При выборе состава сплава и режима его работы обращают внимание на следующие особенности.

Во-первых, это летучесть оксидной пленки. Большое значение на скорость старения электронагревательных приборов, работающих на воздухе, оказывают свойства оксида, образующегося на поверхности сплава. Если оксид летучий, то он быстро улетучивается с поверхности сплава и не может защитить оставшийся металл от дальнейшего окисления (например, оксид вольфрама и молибдена). А потому такие металлы не могут работать в накаливаемом состоянии при доступе кислорода. Если же оксид не летуч, то он образует при окислении прочный защитный слой на поверхности металла.

Во-вторых, это равенство температурных коэффициентов оксидной пленки и сплава:  $\alpha_l^{\text{окс.пленки}} \approx \alpha_l^{\text{сплава}}$ . Если они не равны, то при нагреве сплав будет расширяться сильнее, чем оксидная пленка на его поверхности, поэтому она будет трескаться, а в трещинах окисляться заново и т.д. В результате от многократного кратковременного включения электронагревательного элемента из такого сплава он может перегореть значительно быстрее, чем от непрерывной работы при той же температуре. В связи с этим подобные сплавы должны работать в режиме длительного нагрева, без резких перепадов температур.

Если  $\alpha_l^{\text{окс.пленки}} \approx \alpha_l^{\text{сплава}}$ , то сплав будет расширяться одновременно с оксидной пленкой, и тогда его можно использовать при кратковременных режимах нагрева.

Примерами сплавов на основе железа являются нихромы, ферронихромы, хромали и фехрالي.

*Нихромами* называются сплавы системы Fe + Ni + Cr. *Ферронихромы* – это сплавы с повышенным содержанием железа.

Удельное сопротивление нихрома  $\rho = 1,0 \dots 1,2 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.); } T_{\text{раб}} = 1 \text{ } 100 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

Стойкость хромоникелевых сплавов при высокой температуре в воздушной среде объясняется близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения этих сплавов и их оксидных пленок.

Срок жизни электронагревательных элементов из нихрома зависит также от равномерности сечения проводника по всей длине (в местах с уменьшенным сечением нагревательные элементы перегреваются и легче перегорают).

Недостатком нихромов является содержание в них никеля – дорогого и дефицитного металла.

*Хромали* – это сплавы системы Fe + Cr + Al. *Фехрали* – это те же сплавы, но с повышенным содержанием железа.

Удельное сопротивление хромалей  $\rho = 1,2 \dots 1,5 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.); } T_{\text{раб}} = 1 \text{ } 200 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

Хромоалюминиевые сплавы (фехраль и хромаль) намного дешевле нихрома: хром Cr и алюминий Al дешевле и доступнее никеля Ni. Однако они менее технологичны, более тверды и хрупки, из них могут быть получены проволоки и ленты большего сечения, чем из нихромов. Потому эти сплавы используются в электротермической технике для изготовления электронагревательных приборов большой мощности и промышленных электропечей.

### Тема 3.6. Другие проводниковые металлы

**Вольфрам** – чрезвычайно тяжелый металл серого цвета; среди всех металлов имеет наиболее высокую температуру плавления.

Его основные характеристики:

$$\rho = 0,055 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.);}$$

$$\sigma_p = 4\,000 \text{ МПа;}$$

$$\Delta l/l = 4 \%;$$

$$t_{\text{плав}} = 3\,380 \text{ }^\circ\text{C;}$$

$T_{\text{раб}} = 2\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ , однако при этой температуре вольфрам должен работать без доступа кислорода, в противном случае он очень быстро окисляется и его удельное сопротивление резко увеличивается до  $0,7 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

Применяют вольфрам для изготовления нитей ламп накаливания, подвижных электрических контактов.

**Серебро** – серебристый металл, стойкий против окисления при нормальной температуре, обладающий самым маленьким удельным сопротивлением:  $\rho = 0,016 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.);}$   $\sigma_p = 200 \text{ МПа; } \Delta l/l = 50 \%$ .

Серебряную проволоку используют для изготовления электрических контактов, рассчитанных на небольшие токи. Серебро можно наносить на диэлектрики в качестве электродов в керамических и слюдяных конденсаторах.

Однако несмотря на свои высокие характеристики, серебро имеет крайне ограниченное применение, т.к. это дорогой и дефицитный металл, кроме того, оно имеет склонность к миграции внутрь диэлектрика в условиях высокой влажности.

**Олово** – мягкий металл серебристо-белого цвета, обладающий высокой стойкостью к окислению, но низкой механической прочностью:  $\sigma_p = 16 \dots 38 \text{ МПа}$ .

Его удельное сопротивление  $\rho = 0,12 \text{ мкОм}\cdot\text{м (при н.у.)}$ .

Применяется в качестве антикоррозионных покрытий металлов; входит в состав бронз и припоев. Тонкая оловянная фольга применяется в производстве конденсаторов.

### Тема 3.7. Припой и флюсы

*Припой* – это специальные сплавы, применяемые при пайке. Пайка осуществляется для создания между соединяемыми деталями механически прочного шва. Припой должны иметь температуру плавления меньше, чем у сплавляемых металлических частей. На границе соприкосновения расплавленного припоя и твердого металла происходят сложные физико-химические процессы. Припой смачивает металл, растекается по нему и заполняет зазоры между соединяемыми деталями. При этом припой диффундирует в основной металл и тот растворяется в припое, в результате чего образуется промежуточная прослойка, которая после застывания соединяет детали в одно целое.

Припой подразделяются на *мягкие* (температура плавления до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и *твердые* (температура плавления выше  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ). К мягким относятся прежде всего оловянно-свинцовые (ПОС-18 до ПОС-90). Содержание олова в них от 18 до 90 %. Существуют также мягкие припои с добавками алюминия и серебра. Твердые припои могут быть медно-цинковыми (ПМЦ) и серебряными (ПСр).

*Флюсы* – вспомогательные материалы для получения надежной пайки. Они очищают поверхности соединяемых с помощью пайки деталей от оксидов и загрязнений, защищают в процессе пайки поверхность металла и припой от окисления. В качестве флюса используют канифоль, борную кислоту, водный раствор хлористого цинка, спиртовой раствор канифоли.

## Раздел 4. Полупроводниковые материалы

### Тема 4.1. Общие сведения о полупроводниках

*Полупроводниковые материалы* – большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков.

Электропроводность полупроводников в большей степени зависит от внешних энергетических воздействий, а также от различных примесей, иногда в ничтожных количествах присутствующих в теле «собственного» полупроводника. Управляемость электропроводимостью полупроводника посредством температуры, света, электрического поля, механических усилий положена в основу принципа действия терморезисторов, фоторезисторов, нелинейных резисторов и т.д.

Наличие у полупроводников двух типов электропроводности: электронной и электронно-дырочной – позволяет получить полупроводниковые изделия с *p-n*-переходом. Сюда относятся различные типы мощных и маломощных выпрямителей, усилителей и генераторов. Полупроводниковые генераторы с успехом могут быть использованы для преобразования различных видов энергии в энергию электрического поля (например, солнечные батареи и термоэлектрические генераторы). С помощью полупроводников можно понижать температуру на несколько десятков градусов.

В настоящее время рекомбинационное свечение электронно-дырочных переходов, происходящее при высоком напряжении и постоянном токе, используется для создания сигнальных источников света, а также в устройствах вывода информации из вычислительных машин. Полупроводники могут служить нагревательными элементами, индикаторами радиоактивных излучений, с их помощью можно измерять напряженность магнитного поля и т.д.

Изготовленные из полупроводниковых материалов приборы обладают следующими преимуществами:

- большой срок службы;
- малые габариты и масса;
- простота и надежность конструкции;
- большая механическая прочность (не боятся тряски и ударов);
- потребление малой мощности;
- экономичность при массовом производстве.

## Тема 4.2. Классификация полупроводников

Используемые в практике полупроводники разделяются:

1) по химическому составу:

- простые (образованные атомами одного элемента: Si, Se...);
- сложные (в состав входят атомы двух или более элементов: SiC, ZnSe);

2) по агрегатному состоянию:

- стеклообразные;
- жидкие;

3) по электропроводности:

- *собственные*, не содержащие примесей, которые влияют на электропроводность (рис. 1.30).

Электроны в зону свободных энергетических уровней могут поставляться только из заполненной электронами (валентной) зоны;

• *примесные*, содержащие чужеродные атомы другого элемента либо избыточные по стехиометрическому составу атомы тех самых элементов, которые входят в формулу соединения. Роль примесей могут играть всевозможные дефекты кристаллической решетки: пустые узлы, атомы и ионы в междоузлиях, микротрещины и т.д. Примесные полупроводники, в свою очередь, делятся на *донорные* и *акцепторные* (рис. 1.31).

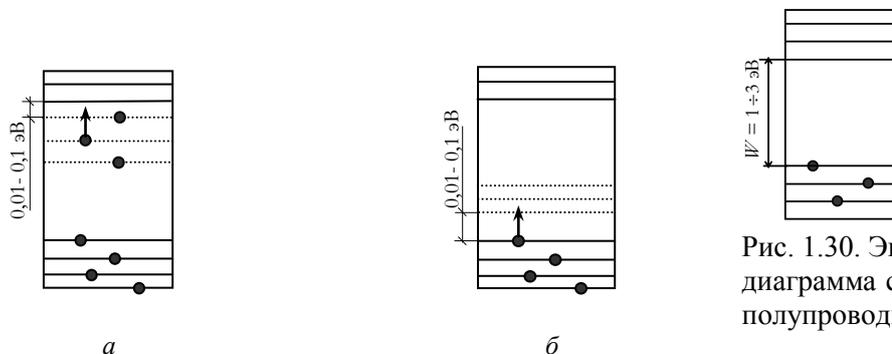


Рис. 1.30. Энергетическая диаграмма собственного полупроводника

Рис. 1.31. Энергетическая диаграмма примесного полупроводника: а – с донорной примесью; б – с акцепторной примесью

## Тема 4.3. Элементы, обладающие свойствами полупроводников

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа (0,5 час).

**Германий (Ge)** – ковалентный кристалл, твердый и хрупкий. Содержание его в земной коре невелико и составляет примерно 0,001 %. Получают его в основном в результате сложного технологического процесса из продуктов сгорания бурого угля. Выпускается германий различных марок, которые различаются между собой содержанием примесей и, соответственно, значением удельного сопротивления. В среднем собственное удельное сопротивление германия при температуре, равной 20 °С,  $\rho = 0,47 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . При плавлении  $\rho$  резко уменьшается примерно в 13 раз. При дальнейшем нагреве сначала почти не изменяется, а начиная с  $t = 1\ 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , возрастает.

Используется германий в производстве полупроводниковых приборов, например выпрямителей переменного тока различной мощности, транзисторов. Из него делают преобразователи Холла для измерения напряженности магнитного поля, тока и мощности; преобразователи для умножения двух величин в вычислительной технике и т.д. Оптические свойства позволяют использовать германий для изготовления фототранзисторов и фоторезисторов, оптических линз, фильтров и т.д. Германий может также использоваться для изготовления счетчиков ядерных частиц.

Рабочий диапазон температур германиевых приборов от  $-60$  до  $+70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Данные приборы должны быть защищены от действия влажного воздуха.

**Кремний (Si)**, как и германий, относится к ковалентным кристаллам. Это один из наиболее распространенных элементов земной коры ( $\approx 30 \%$ ).

Его удельное сопротивление  $\rho = 2\ 000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Электропроводность кремния очень сильно зависит от концентрации примесей. В настоящее время кремний является основным материалом для изготовления полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, фотоэлементов и т.д. Для кремниевых приборов верхний предел  $T_{\text{раб}}$  может достигать  $120\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ , что значительно выше, чем у германия.

**Селен** получают при электрической очистке меди. Селен может быть и аморфным телом, и кристаллическим, разного цвета. Не взаимодействует с водой. Удельное сопротивление селена изменяется в очень широких пределах:  $1\text{--}10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  – и зависит от рода и концентрации примесей, температуры, освещенности. Температурный интервал селеновых приборов от  $-60$  до  $+75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Из селена изготавливают фоторезисторы, фотоэлементы, линзы и выпрямители.

#### Тема 4.4. Химические соединения со свойствами полупроводников

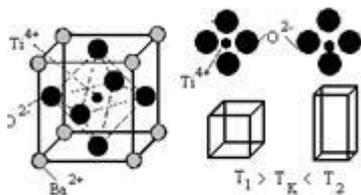
Лекция проводится в интерактивной форме: с разбором конкретных ситуаций (0,25час).

Полупроводниковыми свойствами обладают многие химические соединения. В химии полупроводниковых соединений приняты обозначения типа АІІВV, где АІІ – элемент третьей группы, а ВV – элемент пятой группы.

##### Соединения типа АІVВІV.

Одним из важнейших для техники соединений типа АІVВІV является карбид кремния. Взаимодействие кремния с углеродом приводит к усилению ковалентной связи, следовательно, температура плавления карбида кремния будет выше, чем у чистого кремния. Кроме того, у карбида кремния повышается величина запрещенной зоны. Поэтому из карбида кремния можно изготавливать приборы, работающие при более высокой температуре, чем кремниевые приборы.

##### Полупроводниковые соединения типа АІІВV.



Эти соединения образуются в результате взаимодействия элементов III–б подгруппы периодической таблицы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V–б подгруппы (азотом, фосфором, мышьяком и сурьмой). Для соединений такого типа характерен тип химической связи называемой донорно-акцепторной. Этот тип связи представляет собой переход от ковалентной связи к ионной. Физические свойства таких материалов определяются энергией связи, которая уменьшается по мере роста порядкового номера элементов, входящих в состав материала. Подвижность носителей заряда в полупроводниках такого типа ограничивается в основном рассеянием электронов на оптических тепловых колебаниях решетки, под которыми понимают противофазное

смещение соседних атомов. Поскольку атомы АІІІ и ВІV обладают некоторым ионным зарядом, то их противофазное смещение приводит к появлению дипольного момента, являющегося эффективным центром рассеяния носителей заряда. Чем больше разность электроотрицательностей элементов, образующих соединение, тем сильнее выражена ионная составляющая химической связи. Соответственно возрастает рассеяние электронов и дырок на оптических колебаниях и уменьшается подвижность носителей заряда.

Многообразие свойств полупроводников типа АІІВV привело к их широкому применению в различных технических устройствах. На их основе изготавливают инжекционные лазеры и светодиоды. У арсенида галлия ширина запрещенной зоны близка к ширине запрещенной зоны кремния, а подвижность носителей заряда близка к подвижности носителей заряда германия. Поэтому данный материал является весьма перспективным для изготовления интегральных микросхем с высоким быстродействием.

### ***Полупроводниковые соединения типа АІІВVI***

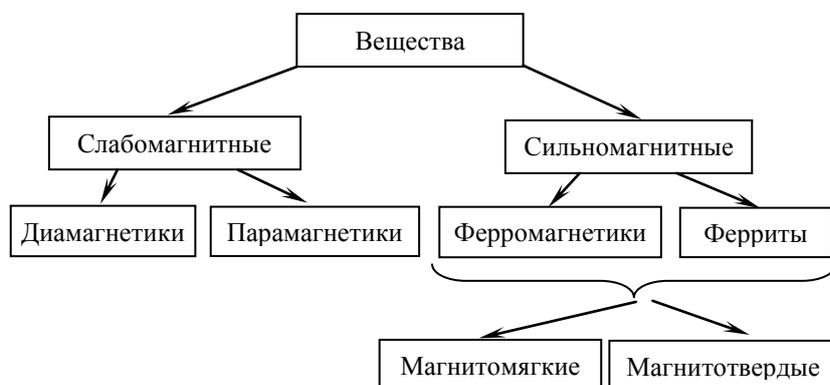
К соединениям типа АІІВVI относят халькогениды цинка, кадмия и ртути. Химическая связь носит смешанный ковалентно-ионный характер. Компонента ионной связи в таких соединениях выражена сильнее по сравнению с соединениями типа АІІВV. С ростом средней атомной массы атомной массы соединений уменьшается ширина запрещенной зоны и снижается температура плавления, одновременно повышается подвижность носителей заряда. Соединения типа АІІВVI применяются для изготовления фоторезисторов, обладающих высокой чувствительностью в видимой области спектра, а также для изготовления люминофоров.

## **Раздел 5. Магнитные материалы**

Магнитные свойства веществ зависят:

- от их структуры;
- формы движения заряженных частиц;
- свойств молекулярных частиц;
- вида связи между атомами и молекулами;
- групп атомов и молекул;
- внешних механических воздействий.

В зависимости от магнитных свойств все вещества делятся на *слабوماгнитные* и *сильномагнитные* (рис. 1.32).



К слабوماгнитным материалам относятся диамагнетики ( $\mu_r < 1$ ) и парамагнетики ( $\mu_r > 1$ ), причем их магнитная проницаемость  $\mu_r$  не зависит от напряженности магнитного поля. Примерами диамагнетиков являются водород, медь, золото и т.д. Примерами парамагнетиков – кислород, алюминий, цинк и т.д. Парамагнетики и диамагнетики обладают очень низкими магнитными свойствами, поэтому как магнитные материалы в электротехнике используются крайне редко.

В качестве магнитных применяются в основном сильномагнитные материалы: ферромагнитные вещества и ферритные химические соединения (ферриты).

*Ферромагнетик* – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

*Феррит* – кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Сильномагнитные материалы обладают способностью намагничиваться.

## Тема 5.1. Параметры, характеризующие свойства магнитных материалов

Характеристиками магнитных материалов служат:

1. Относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$ , определяемая по формуле

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1.26)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Для сильномагнитных материалов различают две величины магнитной проницаемости: начальную и максимальную (рис. 1.33). В области сильных магнитных полей магнитная проницаемость уменьшается, приближаясь к единице.

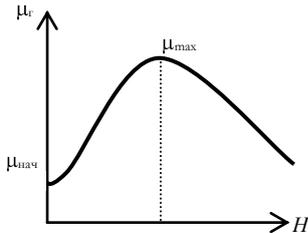


Рис. 1.33. Зависимость  $\mu_r = f(H)$  для сильномагнитных материалов

2. Температурный коэффициент магнитной проницаемости  $\alpha_\mu$ , равный

$$\alpha_\mu = \frac{1}{\mu_r} \frac{d\mu_r}{dT}. \quad (1.27)$$

Температурный коэффициент показывает, на сколько изменяется магнитная проницаемость при изменении температуры на 1 К.

При увеличении температуры магнитная проницаемость увеличивается (рис. 1.34). При превышении  $t_{\text{Кюри}}$  из-за теплового движения магнитная проницаемость резко падает до нуля и материал теряет магнитные свойства.

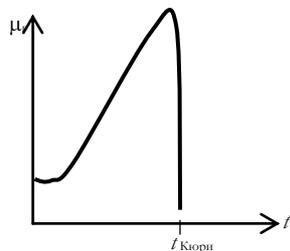


Рис. 1.34. Зависимость  $\mu_r = f(t^\circ)$  для магнитных материалов

3. Остаточная магнитная индукция  $B_r$ , Тл.

*Остаточная магнитная индукция* – это значение  $B$  при  $H = 0$  в процессе размагничивания образца, намагниченного до насыщения (рис. 1.35).

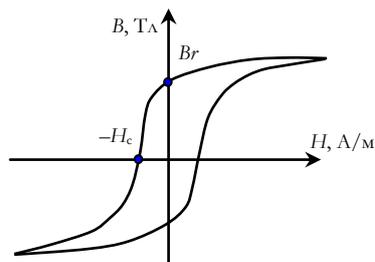


Рис. 1.35. Петля гистерезиса

4. Коэрцитивная сила  $H_c$ , А/м.

Для того чтобы уменьшить остаточную индукцию от  $B_r$  до нуля, необходимо приложить обратно направленную напряженность магнитного поля  $H_c$ , называемую *задерживающей* (коэрцитивной) силой.

5. Потери мощности на намагничивание  $P_n$ , определяемые по формуле

$$P_n = \eta B_{\max}^n f V, \quad (1.28)$$

где  $\eta$  – коэффициент, характеризующий данный материал;  $B_{\max}$  – максимальная индукция магнитного поля;  $n$  – показатель степени;  $f$  – частота приложенного магнитного поля;  $V$  – объем магнитного материала.

6. Потери мощности на вихревые токи  $P_f$ :

$$P_f = \xi B_{\max}^2 f^2 V, \quad (1.29)$$

где  $\xi$  – коэффициент, зависящий от формы детали и материала из которого она изготовлена,  $\xi \approx 1/\rho$ ;  $\rho \uparrow \xi \downarrow P_f \downarrow$ .

Потери мощности на намагничивание и вихревые токи приводят к нагреву магнитного материала. Чем потери выше, тем сильнее нагревается материал.

7. Максимальная энергия ( $W_{\max}$ , кДж/м<sup>3</sup>), отдаваемая магнитом во внешнее пространство.

В зависимости от параметров сильномагнитные материалы подразделяются на магнитомягкие (ММ) и магнитотвердые (МТ). Магнитомягкие используются как проводники магнитного потока. Магнитотвердые – как его источники.

## Тема 5.2. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью ( $\mu$ ), низкой коэрцитивной силой ( $H_c$ ), малыми потерями на гистерезис (намагничивание,  $P_n$ ), и благодаря таким свойствам являются хорошими проводниками магнитного потока. Они используются в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции.

Ниже приведены основные представители магнитомягких материалов и их характеристики.

**Железо (низкоуглеродистая сталь).** Технически чистое железо обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, фосфора, водорода, кислорода, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. В результате этого оно редко используется в качестве магнитного материала и в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного потока.

**Низкоуглеродистая электротехническая листовая сталь** – это одна из разновидностей технически чистого железа. Содержит не больше 0,04 % углерода и не больше 0,6 % других примесей. Максимальное значение  $\mu_r$  для различных марок 3500–4500;  $H_c = 65 \dots 100$  А/м;  $P = 0,1$  мкОм·м.

Для магнитных материалов электротехническая сталь имеет низкое удельное сопротивление, поэтому выпускается она в виде листов толщиной 0,2–4,0 мм. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечники в трансформаторах склеивают из отдельных тонких листов с помощью клеящего лака. Лак является диэлектриком, поэтому сопротивление всего сердечника увеличивается и потери на вихревые токи снижаются.

**Кремнистая электротехническая сталь** является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в ее состав кремния (Si) достигается повышение ее удельного сопротивления и снижение потерь на вихревые токи. Кроме этого, наличие в стали кремния способствует выделению из нее углерода в виде графита и приводит к полному ее раскислению, а также увеличению  $\mu$  и снижению потерь на гистерезис.

Сталь, содержащая до 4 % кремния, обладает достаточно удовлетворительными механическими свойствами, а при наличии его выше 5 % она становится очень хрупкой.

**Пермаллои** – это железоникелевые сплавы (Fe+Ni), обладающие весьма большой начальной магнитной проницаемостью  $\mu_r$  в области слабых магнитных полей.

В зависимости от содержания никеля пермаллои бывают:

- высоконикелевые – 70...83 % Ni, остальное Fe;
- низконикелевые – 40...60 % Ni, остальное Fe.

От этого же зависят основные магнитные свойства и удельное сопротивление пермаллоев. Магнитная проницаемость  $\mu_r$  высоконикелевых сплавов в несколько раз выше, чем низконикелевых, и намного превышает  $\mu_r$  электротехнических сталей.

Высоконикелевые пер-маллои	Низконикелевые пер-маллои
$\mu_r^{\max} = (50 \dots 220) \cdot 10^3$	$\mu_r^{\max} = (16 \dots 35) \cdot 10^3$
$H_C = 1 \dots 5 \text{ А/м}$	$H_C = 10 \dots 30 \text{ А/м}$

Оптимальным считается сплав, содержащий 78,5 % никеля. Он называется *супермаллой*:  $\mu_r^{\max} = 1\,500\,000$ ;  $H_C = 0,3 \text{ А/м}$ .

Магнитные свойства пермаллоев зависят от наличия инородных примесей в сплаве и их химического состава, а также от режима термообработки.

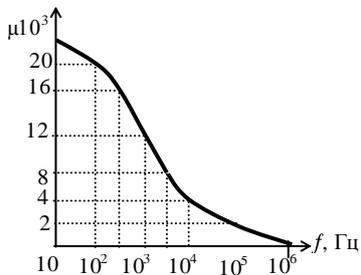


Рис. 1.36. Зависимость  $\mu_r = f(f)$  для пермаллоев

Кроме того,  $\mu_r$  пермаллоев сильно зависит от частоты приложенного магнитного поля  $f$  (рис. 1.35), причем зависимость тем резче, чем больше её первоначальное значение. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых потоков из-за небольшого удельного сопротивления.

Для улучшения магнитных и механических характеристик пермаллоев, придания сплавам определенных свойств в их состав вводят следующие добавки:

- молибден Мо и хром Cr, повышающие удельное сопротивление и начальную  $\mu_r$ , а также уменьшающие чувствительность пермаллоев к деформациям;

- медь Cu, которая увеличивает постоянство  $\mu_r$  в узких интервалах напряженности магнитного поля, повышает температур-

ную стабильность и удельное сопротивление, а также делает сплавы легко поддающимися механической обработке;

- кремний Si и марганец Mn, повышающие механическую прочность.

Применяют пермаллои для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Тонкие ленты из пермаллоев используют в качестве материала для изготовления ячеек памяти в устройствах вычислительной техники. Применение пермаллоев ограничено из-за их высокой стоимости, которая определяется содержанием в их составе никеля – дорогого и дефицитного материала.

**Альсиферы** – сплавы железа с кремнием и алюминием (Si+Al+Fe). Его оптимальный состав: Si – 9,5 %; Al – 5,6 %; остальное Fe. Этот сплав отличается твердостью и хрупкостью;  $\mu_r^{\max} = 120\,000$ ;  $H_C = 1,8 \text{ А/м}$ ;  $\rho = 0,8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

Альсиферы не содержат дорогих и дефицитных составляющих, поэтому их широко применяют для изготовления корпусов приборов, металлических экранов. Благодаря хрупкости альсиферы размалывают в порошок и прессуют из них высокочастотные сердечники.

**Магнитомягкие ферриты** – материалы специального назначения – не относятся к металлам и представляют собой металлокерамику с незначительной электронной электропроводностью.

По химическому составу ферриты – это сплавы из оксида железа и оксидов двухвалентных или одновалентных металлов:  $\text{MeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , где MeO – символ двухвалентного металла.

Процентный состав компонентов играет существенную роль в получении технических или иных магнитных свойств материала. Также на свойства ферритов оказывает влияние технология их изготовления. Технологический процесс сводится к тому, что сначала получают порошок из перемешанных оксидов. В него добавляют пластификатор – обычно раствор поливинилового спирта, а из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы и подвергают их обжигу при температуре  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Магнитомягкие ферриты имеют большое удельное сопротивление (превышает сопротивление железа в  $10^6$ – $10^{11}$  раз), а следовательно, небольшие потери энергии в области повышенных и высоких частот.

Ферриты – твердые и хрупкие материалы, не позволяющие производить обработку резанием и допускающие только шлифовку и полировку. Поэтому форму готового изделия им придают заранее, еще при прессовке.

Магнитомягкие ферриты делятся на три группы.

1. *Ферриты с тонкой петлей гистерезиса* (ТПГ-ферриты). Примером является марганцево-цинковый феррит  $\text{MnO}\cdot\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , имеющий следующие характеристики:

$$\begin{aligned} \mu_r^{\text{нач}} &= 15\,000; \\ \mu_r^{\text{max}} &= 35\,000; \end{aligned}$$

$$H_C = 0,24 \text{ А/м};$$

$$\rho = 1 \text{ мОм}\cdot\text{м}.$$

Их недостаток – сильная зависимость данных характеристик от частоты приложенного магнитного поля, поэтому они используются только на низких частотах.

2. *Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса* (ППГ-ферриты). При их изготовлении заранее добиваются того, чтобы петля гистерезиса была прямоугольной. Для этого прессовку и обжиг изделия производят в сильномагнитном поле.

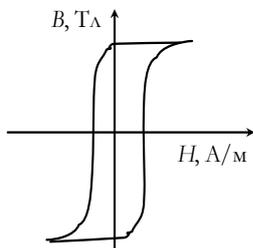


Рис. 1.37. Прямоугольная петля гистерезиса

У ППГ-ферритов остаточная индукция  $B_r$  будет примерно равна максимальной индукции  $B_{\max}$  ( $B_r \approx B_{\max}$ ). Исходя из этого, качество ППГ-ферритов характеризуется коэффициентом прямоугольности петли:

$$k_{\Pi} = \frac{B_r}{B_{\max}}. \quad (1.30)$$

В идеальном случае  $k_{\Pi} = 1$ , для реальных ферритов  $k_{\Pi} \rightarrow 0,9$ .

Кроме этого, ППГ-ферриты должны обеспечивать малое время перемагничивания, минимальные потери энергии при перемагничивании и как можно большую температурную стабильность магнитных характеристик.

Применяются ППГ-ферриты в основном для изготовления ячеек памяти в устройствах вычислительной техники.

3. Специальные марки *ферритов для сверхвысоких частот* (СВЧ-ферриты). В этой области частот в первую очередь используются возможности управления электрическими и магнитными параметрами ферритов. В качестве СВЧ-ферритов применяются в основном никелевые ( $\text{NiO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и магниевые ферриты ( $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Вообще число марок СВЧ-ферритов превышает 60.

### Тема 5.3. Магнитотвердые материалы

В отличие от магнитомягких материалов магнитотвердые обладают низкой магнитной проницаемостью  $\mu_r$  и очень высокой коэрцитивной силой  $H_C$ , поэтому используются в качестве источников магнитного потока (магнитов). Основной характеристикой магнитотвердых материалов является максимальная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство ( $W_{\max}$ , кДж/м<sup>3</sup>).

По составу, состоянию и способу получения магнитотвердые материалы подразделяются на легированные мартенситные стали, литые магнитотвердые сплавы, магниты из порошков, магнитотвердые ферриты, пластически деформируемые сплавы и магнитные ленты.

**Легированные мартенситные стали** являются наиболее простым и доступным материалом для изготовления постоянных магнитов. Кроме железа и углерода в их состав входят добавки вольфрама, кремния, молибдена, углекислого газа и т.д. Мартенситные стали начали применять для производства постоянных магнитов раньше всех других магнитов. В настоящее время они имеют ограниченное применение ввиду их невысоких магнитных свойств:

$$W_{\max} = 4 \text{ кДж/м}^3;$$

$$H_C = 13,6 \text{ кА/м}.$$

Однако полностью от них отказаться не могут, т.к. они дешевы и являются единственными магнитотвердыми материалами, допускающими механическую обработку на металлорежущих станках.

**Литые магнитотвердые сплавы.** Большую магнитную способность имеют тройные сплавы Al+Ni+Fe, которые называют *альни*. Сплав альни с кремнием называют *альнисси*, а сплав с кобальтом – *альнико*. Добавление в эти сплавы Co, Cu, Ti повышает их магнитные свойства, облегчает технологию изготовления и улучшает механические характеристики. У всех магнитотвердых материалов наилучшие магнитные свойства достигаются при значительном искажении кристаллической решетки и обуславливаются не только составом и строением магнитов, но и их специальной обработкой – охлаждением после отливки в сильномагнитном поле.

В среднем литые магнитотвердые сплавы имеют следующие характеристики:

$$W_{\max} = 40 \text{ кДж/м}^3;$$

$$H_C = 145 \text{ кА/м}.$$

Их недостаток в том, что из них трудно изготавливать мелкие изделия с точными размерами вследствие хрупкости и твердости сплавов, допускающих обработку только путем шлифования.

**Магниты из порошков.** Невозможность получить особенно мелкие, со строго выдержанными размерами изделия из литых магнитотвердых сплавов (Fe+Ni+Al) обусловила применение методов порошковой металлургии для производства постоянных магнитов. В зависимости от способа изготовления различают металлокерамические магниты и металлопластические.

*Металлокерамические магниты* изготавливают путем дробления литых магнитотвердых сплавов до тонкодисперсного состояния. Полученную массу прессуют, придавая форму готового изделия, и подвергают спеканию при высоких температурах. Мелкие детали при такой технологии имеют достаточно точные размеры и не требуют дальнейшей обработки.

Запасенная энергия  $W_{\max}$  и остаточная индукция  $B_r$  у металлокерамических магнитов на 10–20 % ниже, чем у литых сплавов, из которых они изготовлены, зато механическая прочность выше литых магнитов в 3–6 раз.

*Металлопластические магниты* изготавливают по типу прессовки пластмасс. Литые магнитотвердые сплавы дробят до зерен крупного размера; в состав полученной массы вводят связующее вещество и далее полученную массу прессуют под высоким давлением (до 500 МПа). Металлопластическая технология позволяет выпускать магниты с арматурой внутри, что повышает их механическую прочность.

Магнитные свойства металлопластических магнитов не высоки:  $W_{\max}$  ниже литых магнитотвердых сплавов на 40–60 %, а  $B_r$  – на 35–50 %, что объясняется наличием в их составе до 30 % немагнитного связующего вещества.

Для выпуска металлопорошковых магнитов экономически выгодно использовать массовое автоматизированное производство.

**Магнитотвердые ферриты.** К их числу можно отнести бариевый феррит ( $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Он обладает очень высокой коэрцитивной силой:  $H_C = 240$  кА/м. Его удельное сопротивление  $\rho = 10^4 \div 10^7$  Ом·м, т.е. во много раз больше, чем удельное сопротивление литых магнитотвердых сплавов;  $W_{\max} = 12$  кДж/м<sup>3</sup>.

Благодаря высокому удельному сопротивлению бариевый феррит имеет очень низкие потери мощности на вихревые токи и поэтому хорошо работает на высоких частотах. Это легкий материал. Кроме того, он почти в 10 раз дешевле магнитов из литых магнитотвердых сплавов.

К недостаткам бариевого феррита следует отнести низкую механическую прочность, хрупкость, а также сильную зависимость магнитных свойств от температуры. При охлаждении до температуры  $-60^\circ$  и дальнейшем нагревании до комнатной температуры бариевый феррит необратимо теряет свои магнитные свойства

## Раздел 6. Технология конструкционных материалов

*Конструкционные материалы* – это материалы, из которых изготавливают несущие конструкции электроустановок, опорные, крепежные, вспомогательные узлы и детали электрических аппаратов.

Так как из конструкционных материалов изготавливают несущие конструкции, то их основной характеристикой является механическая прочность. Конструкционными являются твердые материалы. Газообразные, жидкие, твердеющие материалы могут входить в состав конструкционных только в качестве наполнителей для придания материалам определенных свойств.

### Тема 6.1. Параметры, характеризующие свойства конструкционных материалов

Основные свойства конструкционных материалов – механические, физические, химические, технологические и эксплуатационные.

**Механические свойства.** Параметрами, характеризующими механические свойства, являются механическая прочность, пластичность, твердость и ударная вязкость.

1. *Механическая прочность  $\sigma$* , МПа.

*Деформация* – это способность материалов изменять свои размеры и формы при внешних воздействиях нагрузки либо в результате внутренних физико-химических процессов.

Деформации бывают:

- *упругие* (после снятия нагрузки тело восстанавливает свои размеры и свойства);
- *пластические* (после снятия нагрузки деформация остается).

При увеличении внешней нагрузки упругая деформация переходит в пластическую, а пластическая, при увеличении нагрузки, приводит к разрушению тела.

*Механическая прочность* – способность твердого тела противостоять различным деформациям и разрушению при воздействии статических и динамических нагрузок.

*Статическими* называются нагрузки, действующие равномерно (растяжение, сжатие, изгиб, кручение). С их помощью определяют предел механической прочности:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad (1.31)$$

где  $P$  – нагрузка, действующая на тело, МН;  $F$  – площадь тела, на которую действует нагрузка, м<sup>2</sup>.

Механическую прочность устанавливают с помощью специальных испытаний образцов, изготовленных из исследуемого материала. Испытание тела на растяжение является обязательным.

Для определения механической прочности материала при воздействии динамических нагрузок используют такой параметр, как ударная вязкость:

$$K_C = A / F, \quad (1.32)$$

где  $A$  – работа, которую надо затратить для разрушения твердого тела (Дж);  $F$  – площадь тела, м<sup>2</sup>.

2. *Относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l$ , %*, показывает, на сколько удлиняется материал, прежде чем порваться. Чем  $\Delta l/l$  больше, тем лучше материал.

3. *Твердость* – способность твердого тела сопротивляться внедрению в него другого тела. Определяется по эмпирическим формулам или таблицам; чаще используется твердость по Бринеллю (НВ, МПа):

$$HB = P / F_{\text{отп}}, \quad (1.31)$$

где  $P$  – сила удара шарика, МН;  $F_{\text{отп}}$  – площадь поверхности полученного отпечатка, м<sup>2</sup>.

На рис. 1.37 изображена схема опыта для определения твердости по Бринеллю. С определенной высоты на твердое тело сбрасывают шарик, после чего измеряют площадь отпечатка, оставленного им. Чем меньше площадь отпечатка, тем выше твердость тела; и наоборот.

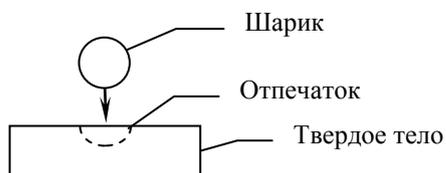


Рис. 1.37. Схема опыта по определению твердости

**Физические свойства** конструкционных материалов характеризуются их температурой плавления, температурным коэффициентом, электропроводностью и теплопроводностью.

**Химические свойства.** К химическим свойствам относится способность к химическому взаимодействию с агрессивными средами.

**Технологические свойства** материала определяют его способности подвергаться различным видам горячей и холодной обработки. К технологическим свойствам относятся:

1) *литейность* – способность материала отливаться в различные формы. Литейность определяется жидкотекучестью материала, степенью усадки при отвердевании, способностью материала к самоликвидации;

2) *деформируемость* – способность материала под воздействием внешней нагрузки принимать различные формы без разрушения и с наименьшим сопротивлением нагрузке. Деформации подвергаются материалы, которые нельзя отлить;

3) *свариваемость* – способность материала соединяться с таким же материалом или другим с созданием между ними механически прочных швов.

**Эксплуатационные свойства** зависят от условий работы данного электрооборудования:

• *коррозионная стойкость* – стойкость материала к воздействию агрессивных сред (кислот, щелочей);

- *хладостойкость* – способность материала сохранять свои характеристики при низких температурах;
- *жаропрочность* – способность материала сохранять характеристики при высоких температурах;
- *жаростойкость* – стойкость материала к окислению в газовой среде при высоких температурах.

### Классификация конструкционных материалов

Конструкционные материалы, применяемые в электротехнике, делятся на три группы:

- неметаллические (стекло, фарфор, дерево и т.д.);
- металлические;
- композиционные.

## Тема 6.2. Металлические конструкционные материалы

Технически чистые металлы обладают низкой механической прочностью. Поэтому в чистом виде в качестве конструкционных используются редко, в основном нашли применение сплавы на их основе.

Сплавы делятся на две группы:

- *чёрные* – сплавы на основе железа (стали и чугуны);
- *цветные* – сплавы на основе алюминия, меди, кобальта, магния, титана и пр.

### 6.2.4. Стали

Сталями называются сплавы железа с углеродом (Fe + C) при содержании  $C \leq 2,14 \%$ . Их механическая прочность на растяжение в среднем  $\sigma_p = 750$  МПа.

Стали классифицируются:

1. *По структуре:*

- эвтектоидная ( $C = 0,8 \%$ );
- доэвтектоидная ( $C < 0,8 \%$ );
- заэвтектоидная ( $C > 0,8 \%$ ).

2. *По химическому составу:*



Для изготовления сварных роторов высокоскоростных электрических машин применяют специальные сложнелегированные стали.

3. *По качеству* – в зависимости от содержания в стали вредных примесей и способа ее производства:

- группа А: сталь обыкновенного качества.

Содержание вредных примесей: серы (S) – 0,06 %; фосфора (P) – 0,07 %. Производится в мартеновских печах;

– группа Б: качественная сталь.

Содержание вредных примесей: S и P ≤ 0,035 %. Производится в мартеновских печах;

– группа В: высококачественная сталь.

Содержание вредных примесей: S и P < 0,025 %. Производится в электропечах;

– особовысококачественная сталь.

Содержание вредных примесей: S и P ≤ 0,015 %. Производится в электропечах.

4. По способу производства:

– в мартеновских печах;

– в кислородных конвертерах;

– в электрических печах (электросталь).

5. По назначению:

• конструкционные стали – применяют для изготовления несущих конструкций электроустановок, опорных и крепежных деталей. Если сталь подвергнуть закалке и отжигу, то из нее можно изготавливать валы, роторы генераторов, а также другие детали, работающие в условиях постоянной вибрации. После закалки механическая прочность увеличивается ( $\delta_p = 1470$  МПа). После отжига сталь используют для изготовления корпусов трансформаторов, конденсаторов и других электрических аппаратов;

• инструментальные стали;

• стали особого назначения – применяют в композиционных материалах.

### 6.2.5. Чугуны

Основа чугунов: Fe + C при содержании C > 2,14 %. Чем больше углерода содержится в сплаве, тем выше его хрупкость. В отличие от сталей чугуны обладают меньшей механической прочностью ( $\delta_p$  до 400 МПа), но повышенной твердостью.

Чугуны получают в доменных печах. Из них изготавливают корпуса приборов, генераторов, высоковольтных выключателей; крышки трансформаторов; крепежную арматуру на воздушных линиях; отдельные части на проходных и опорных изоляторах и т.д.

### 6.2.6. Цветные металлы и сплавы

К цветным металлам, применяемым в качестве конструкционных материалов, относятся алюминий, медь, магний, молибден, вольфрам и т.д.

Цветные металлы и сплавы классифицируются:

1. По плотности:

– легкие (Al, Mn, Ti и сплавы на их основе);

– тяжелые (W, Mo, Cu, Cd, Co, Ni и сплавы на их основе).

2. По легкоплавкости:

– легкоплавкие: алюминий Al, кадмий Cd, висмут Bi, свинец Pb, олово Sn, цинк Zn и сплавы на их основе. Имеют температуру плавления  $T_{\text{плав}} < 1800$  °C;

– тугоплавкие: молибден Mo, никель Ni, вольфрам W, ванадий V и сплавы на их основе.

Имеют температуру плавления  $T_{\text{плав}} > 1800$  °C.

3. По способу обработки:

• литейные – сплавы, которые при высоких температурах не испаряются и поэтому могут отливаться в различные формы;

• деформируемые – материалы, которые при высоких температурах испаряются, следовательно, отливать их нельзя. Поэтому их подвергают различным деформациям для получения нужной формы (прессовке, штамповке, прокатке, протяжке).

#### Алюминий и сплавы на его основе

Алюминий в чистом виде – легкий металл, характеризующийся низкой механической прочностью:  $\sigma_p = 80 \dots 160$  МПа. Относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l < 18$  %.

Промышленность выпускает алюминий следующих марок:

АТП – твердый повышенной прочности;

АТ – твердый;

АПТ – полутвердый;

АМ – мягкий.

Из-за низкой механической прочности чистый алюминий в качестве конструкционного материала используют крайне редко. В основном применяют сплавы на его основе. Сплавы алюминия подразделяются на деформируемые и литейные. Деформируемые предназначены для изготовления изделий методом горячей или холодной деформации. Из литейных сплавов детали изготавливают литьем.

*Деформируемые сплавы:*

- Al + Si + Cu + Fe – *альдрей* – обладает повышенной механической прочностью ( $\sigma_p = 350$  МПа), стойкостью к вибрациям, при этом сохраняет легкость чистого алюминия. Высокие механические свойства приобретает после закалки: сплав нагревают до 510–550 °С, далее его охлаждают в воде и выдерживают при температуре 150 °С.

- Al + Mg (Mg < 5,8 %) – *магналий* ( $\sigma_p = 350$  МПа);

- Al + Cu + Mg + Mn – *дюралюмин* – после термической обработки имеет высокую механическую прочность (за счет меди и марганца) и большое удлинение перед разрывом. Марганец, входящий в состав сплава, увеличивает его твердость и коррозионную стойкость;

- Al + Mn.

*Литейные сплавы:*

- Al + Cu + Si + Mn – *силумин* – обладает повышенной механической прочностью, малой усадкой, хорошей жидкотекучестью. Применяется для изготовления кронштейнов, корпусов конденсаторов и пр.;

- Al + Si ( $\sigma_p = 240$  МПа);

- Al + Mg (Mg = 9,5...11,5 %) – обладает хорошей коррозионной стойкостью; применяется для изготовления деталей, работающих во влажной атмосфере.

### **Медь и ее сплавы**

Механическая прочность чистой меди  $\sigma_p = 260...390$  МПа. Относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l$  до 35 %. Лучшими механическими характеристиками обладают сплавы на основе меди: бронзы (табл. 1.1) и латунь (сплав меди с цинком, Zn + Cu). В различных марках латуни содержание цинка может достигать до 43 %. Латунни, содержащие до 39 % цинка, имеют структуру твердого раствора и называются  $\alpha$ -латунями. Они обладают высокой пластичностью, что позволяет изготавливать из них детали сложной конфигурации.

Добавка к латуни олова, никеля и марганца повышает механические свойства материала, его антикоррозионную стойкость. Свинец значительно повышает литейные свойства латуней и улучшает обработку резанием.

Латунни пластичнее и прочнее чистой меди: их механическая прочность  $\sigma_p = 350...880$  МПа; относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l = 5...65$  %.

Таблица 1.1

Механические свойства некоторых бронз

Параметр	Кадмиевая		Бериллиевая		Фосфористая	
	После отжига	Твёрдотянутая	После отжига	Твёрдотянутая	После отжига	Твёрдотянутая
Предел прочности при растяжении $\sigma_p$ , МПа	310	730	700–790	1620–1750	400	970
Относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$ , %	50	4	20	9	50	3
Область применения	Для изготовления коллекторных пластин		Для изготовления токоведущих пружин, щеткодержателей, штепсельных и скользящих контактов		Для изготовления токоведущих пружин	

### **Магний и его сплавы**

Магний – легкий, мягкий металл, обладающий высокой стойкостью к окислению. Хорошо подвергается механической обработке. В качестве конструкционных материалов применяют не чистый Mg, а сплавы на его основе.

*Деформируемые сплавы:* Mg + Al + Mn.

*Литейные сплавы:* Mg + Al + Zn.

### **Титан и его сплавы**

Титан обладает более высокой механической прочностью, чем стали ( $\delta p = 860$  МПа), поэтому в некоторых случаях он заменяет стальные части электроустановок. Относительное удлинение перед разрывом  $\Delta l/l = 40\%$ .

Титан – легкий металл, и детали из него получаются на 40 % легче, чем из стали. Стоек к коррозии, однако обладает низкой жаростойкостью, быстро окисляется при высоких температурах. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него изготавливают сложные отливки, но обработка его резанием затруднительна.

Из титановых сплавов применяют в основном сплав Ti + Al + Mo. Для получения требуемых механических свойств титановые сплавы подвергают механической обработке (отжигу, закалке) в печах с защитной атмосферой. В отличие от чистого титана сплавы на его основе удовлетворительно обрабатываются резанием.

### Тема 6.3. Композиционные материалы

*Композиционными* называются материалы, состоящие из двух и более компонентов, имеющих разные физико-химические свойства. В результате композиционный материал обладает свойствами, нехарактерными ни для одного из составляющих его компонентов.

Его получают путем введения в основной материал определенного количества другого материала в целях получения определенных свойств.

Рассмотрим структуру композиционного материала на примере хорошо всем знакомого неэлектрического изделия – автомобильной шины. Ее основой является резина. Для улучшения ее механических свойств в нее добавляют порошковые и волокнистые наполнители (в том числе ткани и металлическую проволоку), а также вещества для повышения гибкости, морозостойкости, износостойкости и т.д.

К композиционным материалам, применяемым в электротехнике, следует отнести пластмассы и резины.

#### 6.3.1. Пластмассы

Пластмассами называют материалы, основу которых составляют природные, синтетические и искусственные смолы. Молекулы смол могут иметь разветвленную или линейную структуру (рис. 1.38).

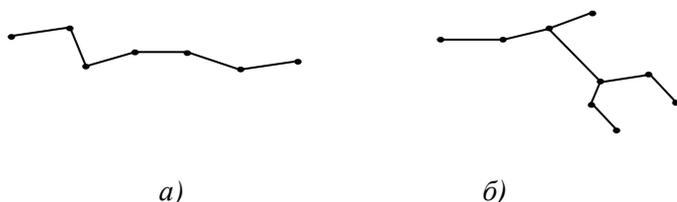


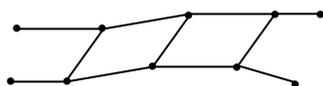
Рис. 1.38. Схемы строения молекул полимеров (смол): а – линейная; б – разветвленная

Линейные молекулы (рис. 1.38, а) имеют форму цепей, в которых атомы соединены между собой ковалентными связями. Отдельные цепи связаны между собой молекулярными (Ван-дер-Ваальсовскими) связями. Наличие в цепях разветвлений (рис. 1.38, б) приводит к ослаблению межмолекулярных сил и, как следствие, к некоторому снижению механической прочности.

Полимеры в зависимости от расположения и взаимосвязи молекул могут находиться в аморфном (с неупорядоченным расположением молекул) и кристаллическом (с упорядоченным расположением молекул) состоянии. При переходе из аморфного состояния в кристаллическое повышается прочность материала и его жаростойкость.

Свойства смол изменяются от воздействия на них теплоты. В зависимости от поведения при повышенных температурах смолы разделяют на термореактивные и термопластичные:

Термореактивные	Термопластичные
Застывают один раз и больше не размягчаются. Структура меняется из линейной на пространственную (рис. 1.39)	Размягчаются при каждом нагреве, при остывании затвердевают



### Рис. 1.39. Пространственная структура пластмассы

Пластмассы в зависимости от входящих в их состав компонентов бывают:

1) *простые* – состоят из смол (полистирол, поливинилхлорид, оргстекло);

2) *композиционные* – основу составляют природные или синтетические смолы, которые в данном случае играют роль связующего вещества между другими компонентами. Свойства смол во многом определяют физико-механические и технологические свойства пластмасс, т.к. содержатся в большом количестве (смолы – 30...70 %).

Кроме смол в состав композиционных пластмасс могут входить следующие компоненты:

- *наполнители*, предназначенные для повышения механической прочности материала, его термостойкости, для уменьшения усадки при отвердевании и снижения стоимости. В качестве наполнителя могут применяться древесная мука, целлюлоза, ткань, бумага, стекловолокно, металлическая сетка или проволока, асбест, кварц;

- *красители* – для придания определенной окраски (сурик);

- *катализаторы* – для ускорения процесса отвердевания пластмассы при её производстве (известь);

- *пластификаторы*, повышающие пластичность, гибкость пластмассы (касторовое масло);

- *смазочные вещества*, в частности стеарин, служащий для повышения стойкости к истиранию.

В результате композиционные материалы характеризуются высокой механической прочностью, а также химической и коррозионной стойкостью.

### 6.3.2. Резины

Резины изготавливают на основе натурального или синтетического каучука.

Натуральный каучук – это дорогой, дефицитный материал, получаемый из сока деревьев, поэтому в электротехнике используется редко. В основном применяют синтетический каучук, который получают из отходов нефтепереработки, из самой нефти или из природного газа. В чистом виде он используется крайне редко. Обычно каучук подвергают вулканизации, в результате которой получается резина. Для вулканизации обычно используют серу. Ее количество определяет эластичность резины: чем серы больше, тем твердость резины выше. Если серы содержится 30 %, то материал – эбонит – характеризуется очень высокой твердостью и негибкостью.

Для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств резины в ее состав могут вводить следующие компоненты:

а) *наполнители*:

– порошкообразные (мел, сажа, тальк);

– волокнистые (шелковая, капроновая или хлопчатобумажная ткань, стеклоткань);

– металлическая проволока или сетка;

б) *красители* (до 10 %);

в) *мягчители* – повышают мягкость и морозостойчивость (парафин, стеарин, канифоль);

г) *противостарители* – замедляют процесс окисления резины, повышают срок ее службы (вазелин).

В результате резины обладают высокой механической прочностью, эластичностью, высокой влаго- и газостойкостью, стойкостью к воздействию агрессивных сред, морозостойкостью, гибкостью, пластичностью.

### 4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в инте- рактивной, актив- ной, инновационной формах, (час.)</i>
2	2.	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2	-
3	2.	Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков	4	-
4	2.	Определение электрической прочности газообразных диэлектриков	2	-
<b>ИТОГО</b>			<b>8</b>	-

### 4.4. Практические занятия

Учебным планом не предусмотрено.

### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом предусмотрена 1 контрольная работа. Выдача задания, прием контрольной работы проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

## 5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	$\Sigma$ <i>комп.</i>	$t_{ср}$ <i>час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ОПК-2</i>				
<b>1</b>		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1.</b> Основы материаловедения		17,75	+	1	17,75	Лк	экзамен
<b>2.</b> Диэлектрические материалы		57,25	+	1	57,25	Лк, ЛР	экзамен
<b>3.</b> Проводниковые материалы		20	+	1	20	ЛК	экзамен
<b>4.</b> Полупроводниковые материалы		11,5	+	1	11,5	Лк	экзамен
<b>5.</b> Магнитные материалы		12,5	+	1	12,5	Лк	экзамен
<b>6.</b> Конструкционные материалы		16	+	1	16	Лк	экзамен
<b>Всего часов</b>		<b>135</b>	<b>135</b>	<b>1</b>	<b>135</b>		

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Колесов, с. Н. *Материаловедение и технология конструкционных материалов* : учебник для вузов / с. Н. Колесов, и. С. Колесов. - 2-е изд., перераб. И доп. - м. : высшая школа, 2008. - 535 с.

2. *Электротехнические и конструкционные материалы: учебное пособие* / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин и др.; Под ред. В.А. Филикова. - 2-е изд., стереотип. - М.:

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1.	Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для вузов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2008. - 535 с.	Лк, ЛР	50	1
<b>Дополнительная литература</b>				
2.	Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б.М. Тареев. - 7 изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. - 304 с. : ил.	Лк, ЛР	117	1
3.	Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / Т. М. Барсукова, В. С. Гаврилюк, А. М. Дмитриев и др.; Под ред. А. М. Дальского. - 6-е изд., испр. и доп. - М. : Машиностроение, 2005. - 592 с.	Лк	25	1
4.	Тарасов, В. Л. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для вузов / В. Л. Тарасов. - 2-е изд. - М. : МГУЛ, 2005. - 272 с.	Лк, ЛР	20	0,8
5.	Яковкина, Т. Н. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / Т. Н. Яковкина. - Братск : БрГУ, 2007. - 144 с.	Лк, ЛР	148	1
6.	Журавлева, Л. В. Электроматериаловедение [Text]: учеб.пособие / Л.В.Журавлева. - 5-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2008. - 352 с. - (Начальное профессиональное образование).	Лк, ЛР	20	0,8
7.	Конструкционные материалы. Полный курс: учебное пособие / М. Эшби, Д. Джонс; Пер. с англ. - Долгопрудный : Интеллект, 2010. - 672 с.	Лк	10	0,4
8.	Электротехнические материалы и изделия: учебное пособие / И. А. Тимофеев. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 272 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература) <a href="https://e.lanbook.com/reader/book/3733/#1">https://e.lanbook.com/reader/book/3733/#1</a>	Лк, ЛР	1+ЭР	1

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ  
[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»  
<http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"  
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)  
<https://uisrussia.msu.ru/> .

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

### 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

#### **Лабораторная работа №1** **Определение электрической прочности жидких диэлектриков**

##### Цель работы:

Ознакомление с методами испытания жидких диэлектриков, определение пригодности испытываемой жидкости для применения в высоковольтных аппаратах путем сравнения опытных данных с характеристиками жидких диэлектриков, приведенных в ГОСТе.

##### Задание:

1. Ознакомиться с прибором и изучить принцип работы электроустановки;
2. Произвести шесть пробоев трансформаторного масла;
3. Записать показания прибора;
4. Рассчитать электрическую прочность трансформаторного масла;
5. На основании результатов измерений и расчетов сделать выводы о пригодности исследуемого трансформаторного масла к дальнейшей эксплуатации.

##### Порядок выполнения:

Все работы с высоковольтным аппаратом АИМ-90Ц производить, стоя на резиновом коврике! Испытания аппаратом АИМ-90Ц осуществляются в следующей последовательности:

- 1) плотно закрыть крышку бака;
- 2) подключить аппарат АИМ-90Ц к сети;
- 3) включить питание аппарата сетевым выключателем на лицевой панели. Через 5 с на дисплее отобразится информация об исходном режиме испытания, что соответствует готовности аппарата к работе (рис.1.3).

ГОСТ 6581-75	ПЕРВ	$\bar{U}_{PP} = \text{-----}$	
	1.....		
	2.....		
	3.....	$\sigma_U = \text{-----}$	
	4.....		
	5.....		
6.....	$V = \text{-----}\%$		
<b>0.0 kV</b>			<b>5:00</b>
№00055			

Рис.1.3. Исходный режим аппарата ( $\bar{U}_{PP}$  - среднее арифметическое значение измеренных напряжений пробоя;  $\sigma_U$  - средняя квадратическая ошибка;  $V, \%$  - коэффициент вариации; **0.0 kV** – цифровые показания испытательного напряжения; **5:00** – продолжительность интервала между пробоями)

4) включить кнопку высокого напряжения, после этого на дисплее появится значок высокого напряжения , а на лицевой панели аппарата включится красный индикатор высокого напряжения;

5) увеличение напряжения на испытуемом объекте будет происходить автоматически до момента пробоя жидкого диэлектрика. После пробоя произойдет запись напряжения пробоя в графе «ПЕРВИЧНОЕ» и в строке «Среднее арифметическое значение пробивного напряжения»  $\bar{U}_{PP}$ . Высокое напряжение отключится. Красный индикатор погаснет.

6) Открыть крышку аппарата. Отсчет времени интервала между последовательными пробоями масла остановится. При помощи чистой сухой стеклянной палочки перемешать масло, удалить твердые продукты разложения между электродами. При этом следует избегать возникновения пузырьков воздуха в испытываемом диэлектрике.

7) закрыть крышку аппарата. Отсчет времени интервала между срабатываниями возобновится. По истечении 5 мин автоматически произойдет следующий пробой масла. Перемешивание жидкого диэлектрика необходимо производить после каждого пробоя!

8) об окончании испытания аппарат известит звуковым сигналом, а программа определит результат испытания жидкого диэлектрика. Для выключения звука требуется приоткрыть крышку бака.

9) после завершения испытаний записать показания прибора;

10) сброс результатов испытания произвести нажатием на кнопку выключения высокого напряжения; затем отключить аппарат сетевым выключателем на лицевой панели;

11) отключить установку от сети.

На основании шести пробоев вычисляется среднее арифметическое значение пробивного напряжения, которое принимают за действительное значение. В соответствии с полученным пробивным напряжением,  $\bar{U}_{ПР}$ , используя формулу (1.1), рассчитать электрическую прочность  $E_{ПР}$ .

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета.

В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Технические характеристики приборов и испытываемых материалов.
3. Схему установки для определения электрической прочности жидких диэлектриков.
4. Результаты экспериментов и выводы по работе о пригодности испытываемого диэлектрика.
5. Подписанный преподавателем протокол экспериментальных измерений.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 2.7, 2.10 раздела 2.

Основная литература : [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6, 8] .

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В каких электрических аппаратах применяют трансформаторное масло?
2. Как влияет на электрическую прочность масла большое число следующих друг за другом пробоев?
3. Почему при стандартном испытании масла берут среднее из шести значений пробивного напряжения, а не удовлетворяются одним-двумя значениями?
4. Почему и как изменяется электрическая прочность масла при появлении в нем воды и других примесей?
5. Как зависит электрическая прочность жидких диэлектриков от их полярности?
6. Как зависит электрическая прочность жидких диэлектриков от температуры?

## **Лабораторная работа №2**

### **Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков**

Цель работы:

Изучение некоторых электрических характеристик диэлектриков и ознакомление с наиболее распространенными способами определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков.

Задание:

1. Ознакомиться с приборами и изучить принцип работы электроустановки;
2. Произвести измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

- для заданных преподавателем материалов;
3. Полученные результаты отразить на графиках;
  4. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

Порядок выполнения:

1. Включить автомат.
2. Повернуть рукоятку ЛАТРа против часовой стрелки до предела.
3. Включить стенд переключателем, расположенным на вертикальной панели стенда.
4. Установить в нулевое положение рукоятки сопротивлений моста  $R_3$  и переключатель чувствительности гальванометра. Рукоятку положения шунтов поставить в положение 0,01. Переключатель полярности поставить в положение “+”.
5. Произвести измерения:
  - 5.1. Вращая рукоятку ЛАТРа по часовой стрелке, выставить по вольтметру напряжение, для которого необходимо провести измерения  $\mathcal{E}_r$  и  $\text{tg}\delta$ .
  - 5.2. Включить выключателем на панели моста осветитель гальванометра и убедиться в появлении на панели узкой световой полоски возле нулевого деления.
  - 5.3. Перевести рукоятку чувствительности гальванометра из нулевого положения до тех пор, пока световая полоса, расширяясь, не займет  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{1}{3}$  всей шкалы.
  - 5.4. Медленно вводя сопротивление  $R_3$ , подобрать такую его величину, при которой световая полоса на шкале имеет минимальную ширину (полное отсутствие тока в гальванометре), записать полученную величину  $R_3$  в таблицу.
  - 5.5. Вращая рукоятки  $\text{tg}\delta$ , продолжить уменьшение ширины луча гальванометра. При получении минимальной ширины луча записать величину полученного  $\text{tg}\delta$  в табл. 3.1.
- Одновременно с уравниванием моста с помощью шунта можно увеличивать чувствительность гальванометра до максимальной величины.
6. Установить переключатель чувствительности гальванометра на нуль и перевести переключатель полярности в другое крайнее положение, снизив на время чувствительность гальванометра с помощью его шунта.
7. Повышая чувствительность гальванометра, произвести измерения при двух противоположных полярностях гальванометра.
8. Записать полученные результаты второго измерения.
9. Результат окончательного измерения получить как среднее арифметическое двух измерений.
10. Окончив все измерения, перевести переключатель шунта гальванометра на нуль, а переключатель полярности – в среднее положение. Снизить регулировочным устройством испытательное напряжение до нуля.
11. Рассчитать величину  $C_x$  по формуле:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3 + r}, \quad (3.11)$$

где  $r$  – сопротивление действующей части реохорда, Ом.

12. Рассчитать величину  $\mathcal{E}_r$  в соответствии с формулой (3.2). Принять  $C_0=10^{-5}$  мкФ;  $C_N=50 \cdot 10^{-6}$  мкФ. Результаты расчетов занести в табл. 3.1.
13. Увеличить напряжение на 1 кВ и повторить измерения.

Таблица 3.1

Подводимое напряжение, $U$ , кВ	Наименование испытуемого материала	Измеряемые величины			Вычисляемые величины	
		$R_3$ , Ом	$r$ , Ом	$\text{tg}\delta$ , %	$C_x$ , ПФ	$\mathcal{E}_r$
2						
3						
.						
.						

7						
---	--	--	--	--	--	--

14. Построить зависимости  $\operatorname{tg}\delta = f(U)$  (кривая ионизации) и  $\varepsilon_r = f(U)$ .

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета.

В отчет по лабораторной работе вносится:

1. Цель работы.
2. Технические характеристики приборов и испытуемых материалов.
3. Схему установки для определения исследуемых характеристик (перевернутая схема).
4. Рабочие формулы с пояснением входящих параметров.
5. Таблицы и графики с результатами экспериментов, измерений и вычислений.
6. Выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 2.4, 2.6, 2.12 раздела 2.

Основная литература: [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6, 8].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что называют диэлектрическими потерями?
2. Как учитываются потери в диэлектрике на постоянном напряжении?
3. От чего зависят потери мощности в изоляции и какое состояние изоляции увеличивает их?
4. Дать определение тангенса угла диэлектрических потерь
5. О чем свидетельствует увеличение  $\operatorname{tg}\delta$  изоляции электрической установки?
6. Перечислить виды диэлектрических потерь.
7. Привести зависимость тангенса угла диэлектрических потерь полярных диэлектриков от температуры. Доказать зависимость.
8. Привести зависимость тангенса угла диэлектрических потерь полярных диэлектриков от частоты. Доказать зависимость.
9. Привести примерные значения тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков различных типов.

**Лабораторная работа №3**

**Определение электрической прочности газообразных диэлектриков**

Цель работы:

Изучить явление пробоя газов, а также определить электрическую прочность воздуха в электродных системах различной конфигурации.

Задание:

1. Изучить теоретический материал;
2. Ознакомиться с приборами и изучить принцип работы электроустановки;
3. Измерить пробивное напряжение в электродных системах различной конфигурации;
4. Рассчитать электрическую прочность воздуха в электродных системах различной конфигурации;
5. Построить графики  $U_{пр}=f(h)$  и  $E_{пр}=f(h)$  для электрического поля разной конфигурации (по три графика на двух координатных плоскостях);
6. Сравнить результаты эксперимента, полученные для разных электродных систем;
7. Сделать выводы по работе.

Порядок выполнения:

1. Экспериментально определить зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами,  $U_{пр}=f(h)$ , для электрического поля различной конфигурации: однородное, неоднородное, резконеоднородное. Пределы изменения величины разрядного промежутка задаются преподавателем.

2. Рассчитать электрическую прочность воздушного промежутка,  $E_{пр}$  при различной степени однородности электрического поля. Электрическую прочность воздушного промежутка определить по формуле:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

где  $U_{пр}$  – напряжение пробоя, кВ;

$h$  – расстояние между электродами, см.

Заполнить таблицу.

Таблица

Сводная таблица результатов работы

	$h$ , см								
→	$U_{пр}$ , кВ								
	$E_{пр}$ , кВ/см								
→ ←	$U_{пр}$ , кВ								
	$E_{пр}$ , кВ/см								
—	$U_{пр}$ , кВ								
	$E_{пр}$ , кВ/см								

3. Построить графики  $U_{пр}=f(h)$  и  $E_{пр}=f(h)$  для электрического поля разной конфигурации (по три графика на двух координатных плоскостях).
4. Сравнить результаты эксперимента, полученные для разных электродных систем.
5. Сделать выводы по работе.

#### Форма отчетности:

Результаты работы оформляются в форме отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему установки для определения исследуемых характеристик.
3. Рабочие формулы с пояснением входящих параметров.
4. Таблицы и графики с результатами экспериментов, измерений и вычислений.

Выводы по работе

#### Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по темам 2.7,2.9 раздела 2.

Основная литература: [1]

Дополнительная литература: [2, 5, 6, 8].

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что означает понятие «пробой диэлектрика»?
2. Чем пробивное напряжение диэлектрика отличается от его электрической прочности?
3. В чем заключается процесс ударной ионизации в газах?
4. Какой разряд называется самостоятельным?
5. Какими параметрами определяется возможность ионизации?
6. Какой разряд называется стримерным?
7. Как зависит пробивное напряжение  $U_{пр}$  (электрическая прочность  $E_{пр}$ ) газов от давления? Доказать зависимость.
8. Как зависит  $U_{пр}$  или  $E_{пр}$  газов от температуры? Доказать зависимости.
9. Как зависит  $U_{пр}$  и  $E_{пр}$  газов от степени однородности электрического поля? Доказать зависимости.

## 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

- ОС Windows 7 Professional
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.

## 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР, №Лк</i>
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Лк	Техника высоких напряжений	демонстрационный стенд по электротехническим материалам, наглядные пособия	№№1-18
ЛР	Техника высоких напряжений	лабораторный стенд с аппаратом АИД-90Ц	№№ 1
		лабораторный стенд с аппаратом АВ-70-05	№№ 3,4
		лабораторный стенд с мостом постоянного тока С-7100	№ 2
		лабораторный стенд с образцами ферромагнитных материалов	№ 5
СР	ЧЗЗ	оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Основы материаловедения	1.1. Классификация материалов	Экзаменационный билет
			1.2. Виды химических связей	Экзаменационный билет
			1.3. Строение твердых тел	Экзаменационный билет
			1.5. Дефекты строения твердых тел	Экзаменационный билет
			1.6. Классификация веществ по электрическим свойствам	Экзаменационный билет
			2. Диэлектрические материалы	2.1. Поляризация диэлектриков
		2.2. Основные виды поляризации		Экзаменационный билет
		2.3. Классификация диэлектриков по виду поляризации		Экзаменационный билет
		2.4. Относительная диэлектрическая проницаемость		Экзаменационный билет
		2.5. Электропроводность диэлектриков		Экзаменационный билет
		2.6. Диэлектрические потери		Экзаменационный билет
		2.7. Пробой диэлектрика		Экзаменационный билет
		2.8. Классификация диэлектрических материалов		Экзаменационный билет
		2.9. Газообразные диэлектрики		Экзаменационный билет
		2.10. Жидкие диэлектрики		Экзаменационный билет
		2.11. Твердые диэлектрики		Экзаменационный билет
		2.12. Твёрдые диэлектрики		Экзаменационный билет
		3. Проводниковые материалы	3.1. Классификация проводниковых материалов	Экзаменационный билет
			3.2. Параметры, характеризующие свойства проводниковых материалов	Экзаменационный билет
			3.3. Материалы высокой проводимости	Экзаменационный билет
			3.4. Сверхпроводники и крио-проводники	Экзаменационный билет
			3.5. Сплавы высокого сопротивления	Экзаменационный билет
			3.6. Другие проводниковые материалы	Экзаменационный билет
			3.7. Припой и флюсы	Экзаменационный билет
		4. Полупроводниковые материалы	4.1. Общие сведения о полупроводниках	Экзаменационный билет
			4.2. Классификация полупроводников	Экзаменационный билет
			4.3. Элементы, обладающие свойствами полупроводников	Экзаменационный билет
			4.4. Химические соединения со свойствами полупроводников	Экзаменационный билет
5. Магнитные материалы	5.1. Параметры, характеризующие свойства магнитных	Экзаменационный билет		

			материалов	
			5.2. Магнитомягкие материалы	Экзаменационный билет
			5.3. Магнитотвёрдые материалы	Экзаменационный билет
		6. Конструкционные материалы	6.1. Параметры, характеризующие свойства конструкционных материалов	Экзаменационный билет
			6.2. Классификация конструкционных материалов	Экзаменационный билет
			6.3. Металлические конструкционные материалы	Экзаменационный билет
			6.4. Композиционные материалы	Экзаменационный билет

## 2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела	
	Код	Определение			
1	2	3	4	5	
1.	ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Конструкционные и электротехнические материалы: основные свойства, назначение.	1. Основы материаловедения	
			2. Общие сведения о строении вещества: виды связей.		
			3. Строение и дефекты твердых тел.		
			4. Атомно-кристаллическое строение твердых тел.		
			5. Фазово-структурный состав сплавов.		
			6. Типовые диаграммы состояния вещества.		
			7. Радиационная стойкость материалов		
			8. Теплопроводность материалов		
			9. Классификация веществ по электрическим свойствам. Энергетические диаграммы диэлектриков, проводников и полупроводников		2. Диэлектрические материалы
			10. Общие понятия о поляризации диэлектрика в электрическом поле		
			11. Поляризация диэлектрика и диэлектрическая проницаемость		
			12. Основные виды поляризации		
			13. Диэлектрическая проницаемость газов		
			14. Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков		
			15. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков		
			16. Общие сведения об электропроводности газов, жидких и твердых диэлектриков. Токи абсорбции и сквозные токи		
			17. Электропроводность газообразных диэлектриков		
			18. Электропроводность жидких диэлектриков		
			19. Электропроводность твердых тел. Объемная и поверхностная электропроводность		
			20. Общие сведения о диэлектрических потерях		
			21. Диэлектрические потери в газах		
			22. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках		
			23. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках		
			24. Тепловое старение изоляции. Классы на-		

		гневостойкости	
		25. Общая характеристика явления пробоя. Параметры, характеризующие пробой	
		26. Факторы, влияющие на характеристики пробоя	
		27. Пробой газообразных диэлектриков	
		28. Пробой жидких диэлектриков	
		29. Пробой твердых диэлектриков. Электрический пробой однородных и неоднородных диэлектриков	
		30. Пробой твердых диэлектриков. Тепловой пробой и электрохимический пробой диэлектрика	
		31. Классификация диэлектрических материалов.	
		32. Газообразные диэлектрики. Основные характеристики и область применения	
		33. Жидкие диэлектрики. Основные характеристики и область применения	
		34. Трансформаторное масло	
		35. Конденсаторные и кабельные масла: основные характеристики, области применения.	
		36. Синтетические жидкие диэлектрики: основные характеристики, области применения	
		37. Общие сведения о смолах (классификация и назначение)	
		38. Природные смолы. Основные характеристики и область применения	
		39. Синтетические смолы. Основные характеристики и область применения	
		40. Общие сведения о лаках и эмалях. Классификация лаков	
		41. Общие сведения об электроизоляционных компаундах (состав, классификация, назначение)	
		42. Гибкие пленки в качестве диэлектрических материалов	
		43. Классификация и области применения волокнистых материалов	
		44. Растительные волокнистые материалы	
		45. Текстильные волокнистые материалы	
		46. Слоистые пластики (гетинакс, текстолит, комбинированные слоистые пластики)	
		47. Неорганические стекла (состав, классификация, основные свойства, область применения)	
		48. Стеклоэмали и ситаллы	
		49. Керамические диэлектрики.	
		50. Слюда и слюдяные материалы.	
		51. Параметры, характеризующие свойства проводниковых материалов.	3. Проводниковые материалы
		52. Классификация и основные свойства проводниковых материалов	
		53. Медь в качестве материала высокой проводимости.	
		54. Алюминий в качестве материала высокой проводимости.	
		55. Железо в качестве материала высокой проводимости.	
		56. Биметалл в качестве материала высокой проводимости.	

			57. Серебро, вольфрам, магний в качестве проводниковых материалов	
			58. Сплавы высокого сопротивления (манганин, константан)	
			59. Сплавы высокого сопротивления (сплавы на основе железа)	
			60. Сверхпроводники и криопроводники	
			61. Припои и флюсы	
			62. Полупроводники: основные свойства, классификация, области применения.	4. Полупроводниковые материалы
			63. Химические соединения со свойствами полупроводников	
			64. Элементы со свойствами полупроводников	
			65. Магнитные свойства веществ. Классификация веществ по магнитным свойствам	5. Магнитные материалы
			66. Параметры, характеризующие свойства магнитных материалов	
			67. Магнитотвердые материалы	
			68. Магнитомягкие материалы	
			69. Параметры, характеризующие свойства конструкционных материалов	6. Конструкционные материалы
			70. Способы термической обработки металлов и сплавов	
			71. Чёрные металлы и сплавы в качестве конструкционных материалов (стали)	
			72. Чёрные металлы и сплавы в качестве конструкционных материалов (чугуны)	
			73. Цветные металлы и сплавы в качестве конструкционных материалов	
			74. Композиционные пластмассы в качестве конструкционных материалов	
			75. Композиционные резины в качестве конструкционных материалов	

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<b>Знать</b> (ОПК-2): -основы материаловедения и технологии конструкционных материалов; -методики по испытанию электротехнических и конструкционных материалов и анализа их характеристик; -электротехнические материалы в качестве компонентов электротехнического и электроэнергетического оборудования; <b>Уметь</b> (ОПК-2): - использовать знания основ материаловедения и технологии конструкционных материалов для понимания физических основ функционирования электрических аппаратов; -оценить состояние материалов по результатам испытаний;	<b>отлично</b>	Оценка «отлично» выставляется в случае, если обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал и демонстрирует: - всестороннее знание программного материала; - умение правильного применения основных положений программного материала; - владеет всеми навыками, полученными в ходе изучения программного материала.
	<b>хорошо</b>	Оценка «хорошо» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует: -недостаточно полное знание программного материала; - применение с несущественными ошибками основных положений программного материала
	<b>удовлетворительно</b>	Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если обучающийся демонстрирует частичное знание программного материала; неоднократно допускал ошибки в ответе
	<b>неудовлетворительно</b>	Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если уровень владения программным материалом не отвечает требованиям; все вышеуказанные разделы не усвоены.

<b>Владеть</b> (ОПК-2): - методиками выполнения расчётов применительно к использованию электротехнических и конструкционных материалов; - методами испытания электротехнических и конструкционных материалов.		
--	--	--

#### **4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности**

Дисциплина Электротехническое и конструкционное материаловедение направлена на ознакомление с основными материалами, применяемыми в электротехнике, и их свойствами; на получение теоретических знаний и практических навыков по испытанию электротехнических и конструкционных материалов и анализу их характеристик; навыков выполнения расчётов применительно к использованию электротехнических и конструкционных материалов в качестве компонентов электротехнического и электроэнергетического оборудования. Изучение дисциплины Электротехническое и конструкционное материаловедение предусматривает:

- лекции,
- лабораторные занятия,
- контрольная работа;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Основы материаловедения» студенты должны уяснить:

- на какие группы делятся все известные материалы;
- какие виды химических связей существуют в различных веществах;
- какое строение могут иметь твердые материалы;
- какие способы термообработки металлов и сплавов применяются для улучшения характеристик материалов;
- как классифицируются вещества по электрическим свойствам.

В ходе освоения раздела 2 «Диэлектрические материалы» студенты должны уяснить:

- какие явления протекают в диэлектриках, внесенных в электрическое поле;
- какими параметрами характеризуются свойства диэлектрических материалов;
- какие основные диэлектрические материалы применяются в электротехнике;
- какие методики и приборы используются для определения основных параметров диэлектрических материалов..

В ходе освоения раздела 3 «Проводниковые материалы» студенты должны уяснить:

- на какие группы подразделяются проводниковые материалы;
- какими параметрами характеризуются свойства проводниковых материалов;
- какие основные проводниковые материалы применяются в электротехнике;
- какие методики используются для определения основных параметров проводниковых материалов.

В ходе освоения раздела 4 «Полупроводниковые материалы» студенты должны уяснить:

- на какие группы подразделяются полупроводниковые материалы;
- какие основные полупроводниковые материалы применяются в электротехнике.

В ходе освоения раздела 5 «Магнитные материалы» студенты должны уяснить:

- на какие группы подразделяются магнитные материалы;
- какими параметрами характеризуются свойства магнитных материалов;
- какие основные магнитные материалы применяются в электротехнике;
- какие методики используются для определения основных параметров магнитных материалов.

В ходе освоения раздела 6 «Конструкционные материалы» студенты должны уяснить:

- какую роль играют конструкционные материалы в электротехнике;

- на какие группы подразделяются конструкционные материалы;
- какими параметрами характеризуются свойства конструкционных материалов;
- какие основные конструкционные материалы применяются в электротехнике;
- какие методики и приборы используются для определения основных параметров конструкционных материалов.

Необходимо овладеть навыками и умениями применения изученных методов для определения основных характеристик электротехнических и конструкционных материалов.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратить внимание на вопросы, связанные с основами химического строения веществ, а также на физические процессы, протекающие в электротехнических материалах под действием электрического поля.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Общие сведения о строении вещества: виды связей;
2. Строение и дефекты твердых тел;
3. Атомно-кристаллическое строение твердых тел;
4. Фазово-структурный состав сплавов;
5. Классификация веществ по электрическим свойствам. Энергетические диаграммы диэлектриков, проводников и полупроводников;
6. Поляризация диэлектрика и диэлектрическая проницаемость;
7. Общие сведения об электропроводности газов, жидких и твердых диэлектриков. Токи абсорбции и сквозные токи;
8. Электропроводность газообразных диэлектриков;
9. Электропроводность жидких диэлектриков;
10. Электропроводность твердых тел. Объемная и поверхностная электропроводность;
11. Диэлектрические потери в газах;
12. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках;
13. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках;
14. Тепловое старение изоляции. Классы нагревостойкости;
15. Общая характеристика явления пробоя. Параметры, характеризующие пробой;
16. Факторы, влияющие на характеристики пробоя;
17. Пробой газообразных диэлектриков;
18. Пробой жидких диэлектриков;
19. Пробой твердых диэлектриков.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний по основным свойствам электротехнических и конструкционных материалов и способам их оценки.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные моменты.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде лекции-дискуссии, лекции-диспута, лекции с разбором конкретных ситуаций) в сочетании с внеаудиторной работой.

## **АННОТАЦИЯ** **рабочей программы дисциплины**

### **Электротехническое и конструкционное материаловедение**

#### **1. Цель и задачи дисциплины**

**Целью изучения дисциплины является:** формирование знаний в области физических основ материаловедения, современных методов получения конструкционных материалов, способов диагностики и улучшения их свойств.

**Задачами изучения дисциплины являются:** Приобретение студентами практических навыков в области материаловедения и эффективной обработки и контроля качества материалов.

#### **2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк 6 ч; ЛР 8 ч; СР 121 ч.  
Общая трудоемкость дисциплины составляет 144 часа, 4 зачетных единиц

##### 2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Основы материаловедения;
2. Диэлектрические материалы;
3. Проводниковые материалы;
4. Полупроводниковые материалы;
5. Магнитные материалы;
6. Конструкционные материалы.

#### **3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ОПК-2 - Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач

#### **4. Вид промежуточной аттестации: экзамен**

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

---

---

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

---

---

---

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,  
(разработчик)

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) от «3» сентября 2015 г. №955

для набора 2014 года: учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «3» июля 2018г. №413.

**Программу составил:**

Яковкина Т.Н. \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «\_\_» \_\_декабря\_\_ 2018 г., протокол №\_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой ЭиЭ\_\_\_\_\_ Булатов Ю.Н.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий выпускающей кафедрой \_\_\_\_\_ Булатов Ю.Н.

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета ЭиА

от «\_\_» \_\_декабря\_\_ 2018 г., протокол №\_\_\_\_\_

Председатель методической комиссии факультета \_\_\_\_\_ Ульянов А.Д.

**СОГЛАСОВАНО:**

Начальник  
учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный №\_\_\_\_\_